

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«ТЮМЕНСКИЙ ИНДУСТРИАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

В. Ф. Гришкевич

НАГЛЯДНАЯ ГЕОДИНАМИКА ЗЕМЛИ С GOOGLE EARTH PRO

Лабораторный практикум

Тюмень
ТИУ
2022

УДК 551.24(03)
ББК 26.3
Г 85

Рецензенты:

кандидат геолого-минералогических наук, доцент М. Д. Заватский;
кандидат геолого-минералогических наук, доцент Ю. А. Загоровский

Г 85 **Гришкевич, В. Ф.** Наглядная геодинамика Земли с
Google Earth Pro: лабораторный практикум / В. Ф. Гришкевич.
– Тюмень: ТИУ, 2022. – 60 с. – Текст: непосредственный.

Книга предназначена для преподавателей и студентов геологического профиля обучения и просто любознательных читателей.

Лабораторный практикум для обучающихся направления подготовки 21.03.01 «Нефтегазовое дело», специальности 21.05.02 «Прикладная геология».

УДК 551.24(03)
ББК 26.3

© Федеральное государственное
бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Тюменский индустриальный
университет», 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
Инсталляция и настройка Google Earth на своём компьютере.....	5
Линейка и другие инструменты Google Earth	6
Осмотрим планету: Первая лабораторная работа от Сиобхам МкГолдрик.....	10
Задание I: Граничные характеристики плит	21
Обсуждение.....	26
Определение скорости относительного перемещения двух плит.....	30
Задание 2 Скорость наращивания коры в зоне спрединга.....	34
Динамика и геометрия перемещения плит	35
Задание 3 Поиск полюса вращения двух плит	38
Тема «Горячие точки» (Hot spots)	39
Задание 4 Динамика перемещения горячей точки	41
Зоны субдукции.....	42
Задание 5 Геометрия зон субдукции.....	48
Задание 6 Схема сегментации плиты Наска.....	50
Заключение	57
Литература	58
Приложение 1 Таблица координат профилей к заданию.....	59



1941-2001

Посвящается моему другу и учителю Владимиру Ильичу Шпильману с его не осуществленной мечтой – на пенсии всерьез заняться глобальной тектоникой.

Введение

«Геоло́гия (от др.-греч. γῆ «Земля» + λόγος «учение, наука») - Википедия. Предметом исследования геологии является вся планета Земля. А **«Геотектоника** – наука изучающая структуру, движения, деформации и развитие в тектоносфере и в Земле в целом. Это раздел геологии, наука о строении, движениях и деформациях литосферы, о её развитии в связи с развитием Земли в целом. Геотектоника составляет теоретическую сердцевину всей геологии» – Википедия.

Google Earth делает буквально доступным общепланетарный взгляд для новичков: любителей и студентов. Более того, программа представляет набор средств изучения геометрии поверхности планеты, аномалий ее гравитационного и магнитного полей, позволяющих лично проверить базовые посылки геодинамики.



В 2012 году Лорел Гуделл (Laurel Goodell, Department of Geosciences, Princeton University, USA) создала тематический набор слоёв по геотектонике **Dynamic Earth** для программы **Google Earth**. Ею были обобщены данные из различных источников, находящиеся в открытом доступе и созданные различными участниками научного сообщества, в том числе, и информация Геологической службы США. А в 2013 году она опубликовала первое учебное задание по тектонике плит («Using Google Earth to Explore Plate Tectonics», https://serc.carleton.edu/sp/library/google_earth/examples/49004.html [6]). В настоящее время аналогичные интерактивные курсы на информационной базе **Dynamic Earth** [6] разработаны во многих университетах мира, но первоначальное задание Лорел Гуделл остаётся из самых массовых по числу обращений в интернете. В данном учебном пособии мы тоже будем использовать программу **Google Earth Pro** [7], слои **Dynamic Earth** [5] и иные слои геолого-геофизической информации, находящиеся в открытом доступе.

Инсталляция и настройка Google Earth на своём компьютере

1. Загрузите (бесплатно) и установите на свой компьютер программу **Google Earth** со страницы <http://earth.google.com/>. Откройте на ней меню, нажав на левой панели рамки верхнюю кнопку с иконкой «три горизонтальные черты». Ссылка на скачивание расположена внизу открывшегося меню, нажав на неё нужно следовать появляющимся обычным указаниям по скачиванию и инсталляции программ.

2. Слои со специальной геодинамической информацией доступны по ссылкам <https://serc.carleton.edu/details/files/38010.html> далее [Dynamic Earth kmz file for use with Plate Tectonics exercises](#)

[USGS 5.4+ epicenters colored by depth.kmz](#) расширенная версия землетрясений

<http://www.iodp.org/resources/maps-and-kml-tools> пробуренные научные скважины,

https://topex.ucsd.edu/grav_outreach/ гравиметрия,

<http://www.geomag.org/models/emag2.html> магнитометрия.

Файлы содержат данные в обменном формате (kmz) географических информационных систем (ГИС или GIS). Эти файлы необходимо выгрузить в рабочую директорию вашего компьютера.

3. Запустите программу Google Earth и откройте в ней файл `Dynamic_Earth.kmz` через пункт главного меню «Файл>Открыть». Когда файл данных будет в Google Earth, переместите его из «Временных меток» в «Мои метки» и сохраним загруженные слои «Меню-Сохранить-Мои метки». Теперь они будут доступны каждый раз, когда вы открываете Google Earth на своём компьютере. Область «Мои метки» удобно структурировать, создавая вложенные папки. Например, создадим новую папку и назовем её «Lab_1». Условимся хранить все создаваемые вами графические элементы в таких папках. Вложенные папки удобны для одновременного включения – выключения визуализации всех находящихся в них созданных вами и логически связанных между собой графических элементов. Для того, чтобы почистить Землю от результатов выполнения очередной лабораторной работы достаточно будет выключить визуализацию папки, без уничтожения ваших построений.

4. Теперь при активном подключении к Интернету у вас есть интерактивный вид на Землю, в том числе границы плит, возраст морского дна, расположение вулканов и эпицентров землетрясений. Настало время бегло познакомиться с планетой Землю и имеющимся в нашем распоряжении инструментарием Google Earth.

• Познакомьтесь со структурой файлов `Dynamic_Earth`, раскрывая и закрывая дерево вложенных данных на боковой панели. Точки ветвления обозначены серыми треугольниками. Щелчки по ним открывают (гипотенуза треугольника стоит) и закрывают (гипотенуза – лежит)

ветви дерева данных. Рядом с треугольником расположено окно управления отображением ветви данных на изображении поверхности Земли. Включение и выключение визуализации различных слоёв и их отдельных элементов осуществляется щелчком по окну управления (V-«птичка» есть или нет).

- Увеличение и уменьшение масштаба картинки может осуществляться клавишами, колесиком мышки и линейкой управления масштабом, появляющейся при перемещении курсора в правый верхний угол экрана. Линейкой масштаб изменяется дискретно (+/- клик по значку или нажатие соответствующей клавиши) или перемещение её ползунка курсором. Перемещение изображения глобуса осуществляется простым перетаскиванием (нажал левую клавишу мышки, перетащил, отпустил), или же через центр управления, высвечивающийся в том же правом верхнем углу окна, либо клавишами со стрелками. «Рука» со стрелками в нижнем круге перемещает изображение вверх, вниз, направо и налево (можно просто нажать требуемую стрелку на клавиатуре). Боковые стрелки в верхнем круге (компасе) вращают изображение по и против часовой стрелке (Shift+← и Shift+→), и нижняя и верхняя стрелки - меридионально его перемещают с изменением угла осмотра (Shift+↑ и Shift+↓). Угол наклона оси вращения глобуса можно изменять, перетаскавая мышкой символ «N» по кругу, двойным щелчком по букве восстанавливается видимое вертикальное положение оси вращения.

- Щелкните левой кнопкой мыши вулкан или землетрясение, чтобы получить информацию об этом элементе. Правую кнопку мышки лучше не использовать, так как, к ней могут быть привязаны дополнительные функции, например, «удалить», что бывает очень неожиданно и очень печально.

- Введите свой домашний адрес (или любое другое интересное место) в окно поиска / перелета и щелкните кнопку «Поиск». Убедитесь в правильности «прибытия» в заказанный пункт. Сверните (закройте) область поиска.

И, как писала Лорела Гуделл, «Хотя заманчиво продолжать «гуглить» по Земле, мы должны продолжить выполнение остальной части задания...».

Линейка и другие инструменты Google Earth

Настало время познакомиться с измерительными инструментами предстоящих лабораторных работ. Нам будут необходимы: «Метка», «Линейка», «Путь», «Многоугольник», представленные клавишами вызова на верхней перекладине рамки.

«**Метка**» - поименованная координатная точка на глобусе, имя метки и других объектов желательно присваивать со смыслом для последующего использования.

Вызов «Линейки», «Пути» или «Многоугольника» приводит к появлению диалогового окна «Линейка» (рис. 1). Активация его закладок пре-

вращает курсор в инструмент создания прямой линии, ломаной линии (пути) или замкнутого многоугольника. Частным видом многоугольника является круг, имеющий свою закладку.

«Линия» на глобусе представляет собой геодезическую прямую (кратчайшую кривую на поверхности геоида), соединяющую её начальную и конечные точки. Созданная линия характеризуется её длиной и направлением в градусах географической системы координат из её начальной точки. Обратите внимание - оценка направления выдается с точностью до сотой доли градуса.

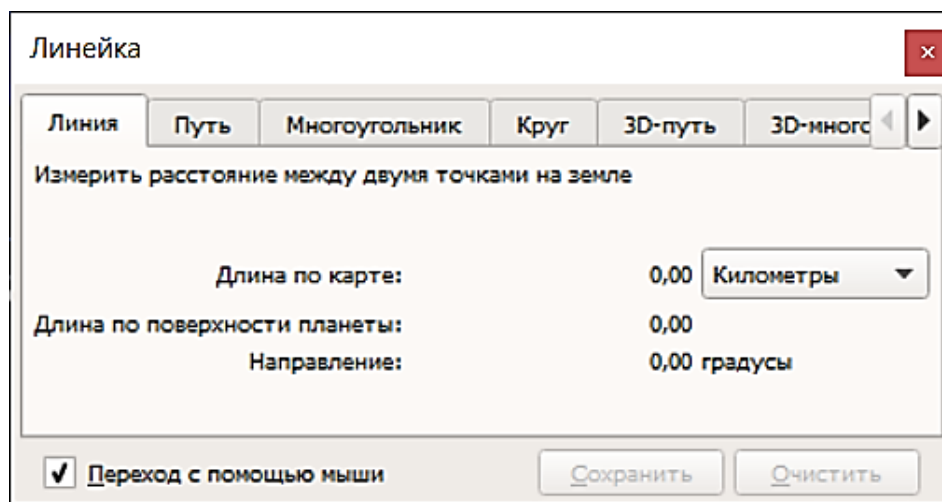


Рисунок 1 - Окно инструмента «Линейка»

Попробуйте измерить длину меридиана Земли, используя эту линейку. «Отправимся» на Северный полюс. Сделаем максимальный или просто очень крупный масштаб изображения. Включим «Линейку», позиционируем курсор по его координатам, отображаемым в нижней строке окна. Желательно, чтобы широта курсора превышала $89^{\circ}59'$, щелчком закрепляем начальный конец линейки и, перемещая курсор, например, вдоль нулевого меридиана, намечаем второй конец линии новым щелчком. Многократно уменьшаем масштаб колёсиком или клавишей «-», перемещаем изображение зажатым курсором или клавишей со стрелкой «вниз» или в сторону, продлеваем линию в выбранном направлении, схватив её за конец приближенным курсором после его превращения из «перекрестия» в «перст указующий». И так повторяем до достижения линией района Южного полюса. Любой клик перекрестием в карту без её перетягивания ведёт созданию новой измеряемой линии. Её придётся создать, затем отменить, и опять повторить всё, начиная с Северного полюса. Зато если вы будете аккуратны и дотяните линию в окрестность Южного полюса, то сможете увеличить изображение колёсиком или клавишей «+» и совершить кругосветное путешествие вокруг него малыми перемещениями курсора – «указующего»

перста». Вслед за курсором протянутая вами линия – меридиан будет послушно обегать вокруг Земного шара. Поместив конец линии максимально близко к полюсу получаем оценку длины половины меридиана по модели **Google Earth**. (Описанный способ позволяет протягивать линии за горизонт видимости, через всю планету с точной фиксацией их конечных точек, что очень пригодится для геодинамических построений). На рисунке 2 длина половины меридиана равна 20003.75 км, при общепринятой величине 20004,3 км.

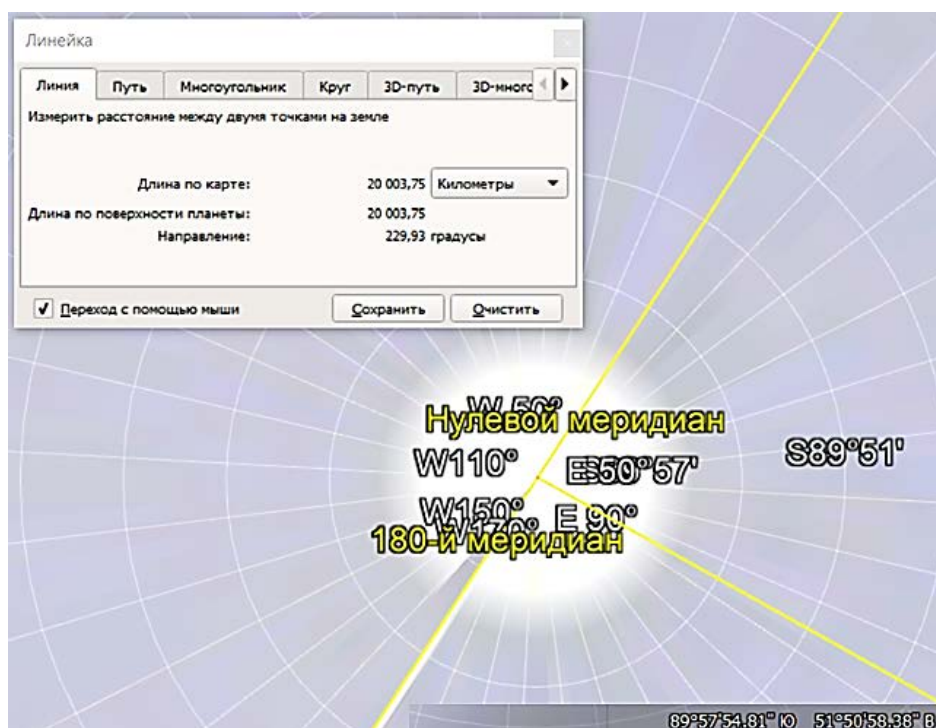


Рисунок 2 - Южное кругосветное путешествие

Можно попробовать выполнить аналогичное измерение длины половины экватора, например, между 0 и 180 меридианами. Длина экватора – 40075.7 км, то есть, длина его половины равна 20037.8 км. Когда длина протягиваемой вами линия измерения экватора превысит 20004 км, она неожиданно «убегает» от вверх или низ от экватора. Объяснение простое: кратчайшим расстоянием между её конечными точками будет обладать путь через полюс - Северный или Южный, в зависимости от малых смещений курсора относительно экватора. Этот эксперимент наглядно подтверждает эллиптическую форму модели Земли и правильность принятой в программе процедуры определения расстояния.

А вот «**Круг**» может быть использован для точного измерения в программе протяженности экватора. Построить круг очень просто. Вызвав «Линейку», активизируем в диалоговом окне закладку «Круг», центр круга определяется точкой первого щелчка курсора «Перекрестие». Дальнейшее

перемещение курсора наращивает или изменяет радиус круга. Второй щелчок фиксирует текущий размер круга. На табло показываются длины радиуса и окружности, а также площадь круга. До закрытия диалогового окна «Линейка» круг может быть изменен перемещением конечной точки его радиуса, к сожалению, а после закрытия окна круг теряет свои центр и радиус. Зафиксированный круг может быть сохранен в виде многоугольника с 72-мя вершинами и, соответственно, гранями. Центральный угол между вершинами равен 5° . Каждая грань представляет собой отрезок геодезической прямой. Оценки длины окружности и площади круга таким многоугольником достаточно высоки. У «Круга», проходящего по экватору, с центром на полюсе сумма длины сторон многоугольника совпадает с длиной экватора, так как экватор является геодезической прямой, и многоугольник просто делит его на 5-градусные сегменты. Аналогично можно проверить и полную длину меридиана, поместив центр «Круга» на экваторе и зафиксировав его радиус на одном из полюсов планеты.

«Многоугольник» будет использован нами для ограничения области исследований. Каждая из его вершин задаётся положением курсора в момент щелчка, Вершины «перетаскиваются» «указующим перстом» и уничтожаются щелчком правой клавиши.

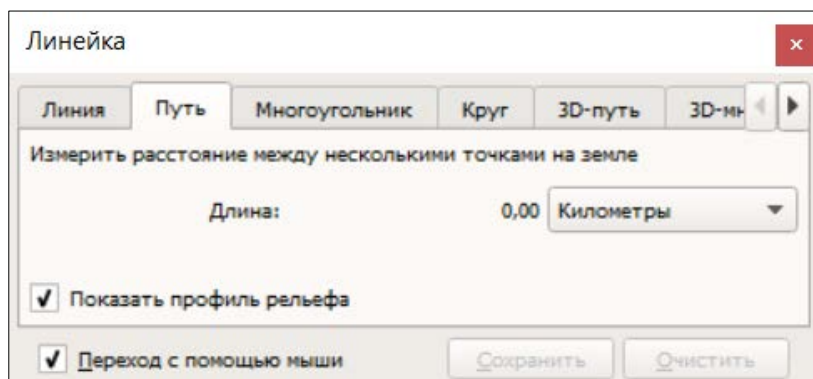


Рисунок 3 - Закладка инструмента «Путь»

«Путь» - незамкнутая ломаная линия — фиксирует направления и углы на карте, полезен для исследования рельефа поверхности. На закладке необходимо включить или выключить окно «Показать профиль рельефа» для управления его автоматическим появлением при создании нового пути (рис. 3).

Напомним, что все создаваемые вами графические элементы разумно хранить в папках отдельных работ. В папке любой из сохраненных элементов может быть проинспектирован через всплывающее меню, достаточно выбрать объект курсором, щелкнуть его правой клавишей мышки и перейти на пункт меню «Свойства». Появляется новое окно, в нем можно просмотреть и изменить некоторые свойства объекта, кроме того, одновременно становятся доступным редактирование (перетаскивание) точек объекта курсором.

Более подробные инструкции по использованию программы имеются в онлайн документации, доступной через пункт «Справка». Вышеизложенный минимум достаточен для нашей будущей работы.

Осмотрим планету: Первая лабораторная работа от Сиобхам МкГолдрик

(Soibhan McGoldrick, Mount Royal University, Calgary, Alberta) [8]



Открытие тектоники плит

Тектоника плит - это модель или теория, которую мы используем для понимания того, как устроена наша планета. В частности, эта модель объясняет происхождение континентов и океанов, складчатых поясов и горных хребтов, магматических и метаморфических пород, землетрясения, вулканы и континентальный дрейф. Тектоника плит была впервые предложена чуть более 100 лет назад, но стала общепринятой частью геологии только около 50 лет назад. Чтобы принять эту теорию потребовалось 50 лет, и тому есть несколько причин. Во-первых, это была настоящая революция в мышлении о Земле, и для многих известных геологов это было трудно принять. Во-вторых, противостояние между основоположником теории Альфредом Вегенером из Германии и геологический истеблишмент того времени, который в основном был сосредоточен в англоязычных Великобритании и США. В-третьих, точных данных о строении Земли, которые подтверждали бы теорию тектонических плит, до середины 20 века просто не существовало. Прежде чем мы углубимся в детали тектоники плит, нам необходимо изучить некоторый исторический контекст, чтобы понять, как эта теория развивалась в течение 20 века.

Большинство ключевых свидетельств тектоники плит было получено в результате изучения дна океана. До 1900 года мы знали практически ничего о батиметрии и геологии океанов. К концу 1960-х годов были составлены относительно подробные карты топографии дна океана, с четким изображением геологии донных отложений и твердых пород под ними на основе геофизической информации о природе океанических и континентальных пород. Некоторые из самых значительных открытий геофизиков XX века, которые сформировали современную теорию тектонических плит, кратко изложены ниже.

1920-е – 1950-е годы

Прорывным для картирования дна океана стало использование разработанных акустических эхолотов (рис. 4). На этой технической базе во время и после Второй мировой войны осуществлялась хорошо организованная кампания по изучению океанов. К 1959 году было со-

брано достаточно батиметрических данных для составления подробных карт Мирового океана (рис. 5), что привело к открытию основные горных цепей во всех океанах мира.

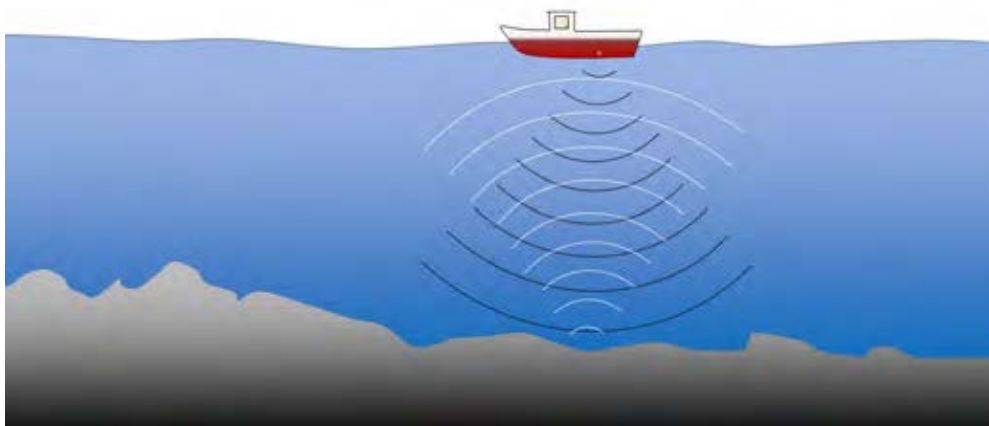


Рисунок 4 - Изображение судового акустического эхолота: прибор издает звук (черные дуги), который отражается от морского дна и возвращается на поверхность (белые дуги).

Время пробега волны пропорционально глубине воды

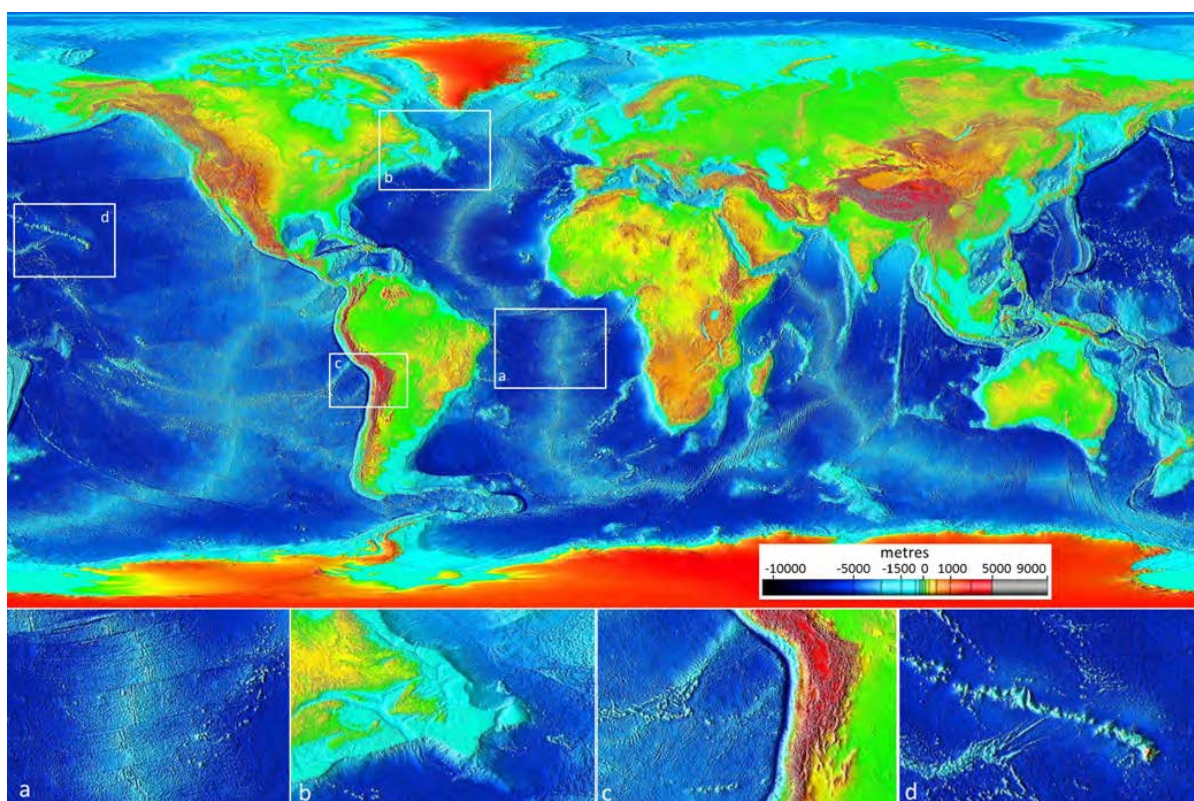


Рисунок 5 - Батиметрия дна океана и континентальная топография. Врезки (а): срединно-Атлантический хребет, (b): Ньюфаундленд - континентальный шельф, (с): Перуанско-Чилийский желоб, примыкающий к Южной Америке, и (d): цепь Гавайских островов

Важные физическо-географические характеристики дна океана:

- Обширные линейные хребты (обычно в центральных частях океанов) с глубиной воды от 2000 до 3000 м (рисунок 5а).
- Зоны трещин, перпендикулярные хребтам (вставка 5а).
- Глубоководные океанические равнины на глубине от 5000 до 6000 м (вставки а и d).
- Относительно плоские и неглубокие континентальные шельфы с глубиной до 500 м (врезка b).
- Глубокие желоба (до 11 000 м), вблизи и параллельно берегам континентов (врезка c).
- Вулканические острова и цепи подводных гор (врезка d).

С развитием сетей сейсмологических станций в 1950-х годах стало возможным с большой точностью наносить на карту местоположения и глубины сильных и слабых землетрясений. Выяснилось, что есть замечательное соответствие между землетрясениями и срединно-океаническими хребтами, и глубокими океаническими желобами. В 1954 году Гутенберг и Рихтер показали, что все землетрясения на океанских хребтах были относительно мелкими. Также ими было подтверждено раннее 1930-х годов предсказание Бенъоффа: землетрясения в окрестностях океанских желобов были как мелкими, так и глубокими, при этом глубина их увеличивалась с удалением от желобов (рисунок 6).

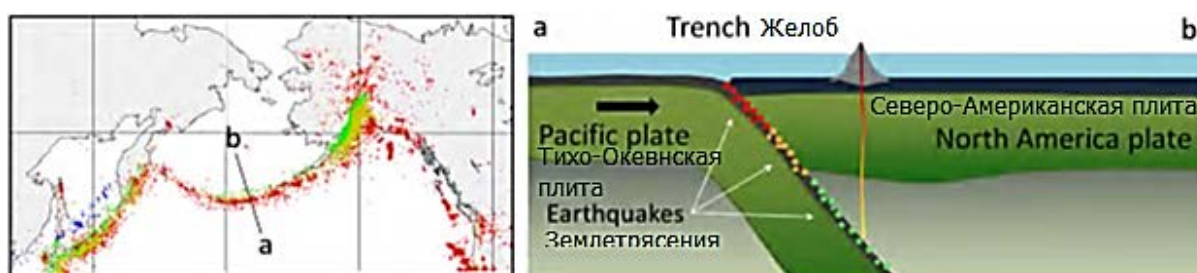


Рисунок 6 - Разрез Алеутской зоны субдукции с изображением увеличения глубины землетрясений «вглубь» от желоба

Другой ключевой аргумент в пользу тектоники плит пришел из исследований остаточного магнетизма пород океанической коры. Обычно остаточный магнетизм вызывается присутствием окисей железа в породах морского дна, часто вулканические породы содержат зерна магнетита (Fe_3O_4) - интенсивными ферромагнитными свойствами. Когда магнетит кристаллизуется из магмы, его кристаллы намагничиваются параллельно магнитному полю Земли в это время. Породы, типа базальта, которые остывают при высокой температуре и обычно имеющие относительно высокий уровень магнетита (до 1 или 2%), особенно подвержены такому намагничиванию, но даже осадки и осадочные породы, если они имеют

небольшое количество магнетита, приобретет остаточный магнетизм, потому что зерна магнетита частично переориентируются при осаждении.

В 1950-х годах ученые из Калифорнийского Океанографического Института Скриппса в убедили береговую службу США включить магнитометрические измерения в одной из экспедиций по изучению топографии дна океана. Первая сводка достоверных палеомагнитных данных морского дна была составлена в 1958 году для прибрежных районов штатов Британская Колумбия и Вашингтон. Эти данные отражала сбивающие с толку чередования на морском дне горных пород с низкой и высокой магнитной напряженностью. Когда в 1961 году эти данные были впервые нанесены на карту (рисунок 7), их никто не понимал – даже ученые, которые их заказали и обобщили. Но эти палеомагнитные данные стали ключевым доказательством расширения морского дна.



Рисунок 7 - Картина магнетизма морского дна за пределами западного побережья Британской Колумбии и Вашингтона

1960-е годы

В 1960 году Гарольд Гесс, широко известный геолог из Принстонского университета, выдвинул теорию, многие элементов которой мы теперь знаем как тектонику плит. Гесс предложил следующее:

- новое морское дно образуется из мантийного материала на хребтах океана,
- старое морское дно опускается в океанские желоба и вновь переплавляется в мантию,
- тектоника плит управляется мантийными конвекционными потоками, поднимающимися под подводными хребтами и опускающимися за желобами (рисунок 8),

- в желобах менее плотная континентальная кора не спускается в мантию вместе с океанической корой, но от столкновения массивы суши сжимаются и приподнимаются вверх, образуя горы.

Теория Гесса легла в основу современных идей о разрастании морского дна и дрейф континентов, но она не содержала концепции о разделении земной коры на отдельные плиты. Хотя модель Гесса и не подвергалась резкой критике, но и не получила широкого признания (особенно в США), отчасти потому, что она была плохо подтверждена неопровержимыми доказательствами.

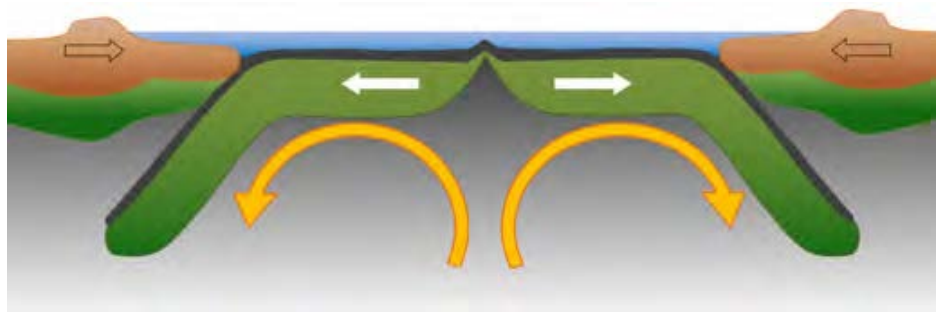


Рисунок 8 - Представление модели Гарольда Гесса для наращивания и субдукция морского дна

В 1963 г. Дж. Тузо Уилсон из Университета Торонто предложил идею мантийного плюма или горячей точки - места, где горячий материал мантии поднимается в виде стационарного и полупостоянного потока и воздействует на вышележащую кору. Он обосновывал эту гипотезу частично на распределении Гавайской и Императорской цепей островов и подводных гор в Тихом океане (рисунок 9). Вулканические породы, из которых состоят эти острова и горы, последовательно омолаживаются в юго-восточном направлении, самые юные из них - моложе 1 млн лет – слагают главный остров Гавайи.

Уилсон предположил, что стационарный плюм апвеллинга горячего материала мантии является источником вулканизма гавайской цепочки и что океаническая кора Тихоокеанской плиты движется на северо-запад над этой горячей точкой. Возле островов Мидуэй цепь претерпевает заметное изменение в направлении, с северо-запада на юго-восток для Гавайских островов и почти с севера на юг для подводных гор Императорской цепочки. Это излом широко приписывается изменению направления дрейфа Тихоокеанской плиты, движущейся над стационарным мантийным плюмом. Но более правдоподобное объяснение состоит в том, что гавайский мантийный плюм на самом деле не был неподвижен на протяжении своей истории, и в действительности он переместился как минимум на 2000 км к югу в интервале между 81 и 45 млн лет прошлого.

В дополнение к своим исследованиям мантийных плюмов и движения плит Уилсон в статье 1965 года представил идею разделения коры на серию жестких пластин, и, таким образом, он – автор термина «тектоника плит».

Есть свидетельства существования множества таких же мантийных плюмов по всему миру (рисунок 10). Большинство из них находятся в океане, включая такие места, как Гавайи, Исландия и Галапагосские острова, но некоторые находятся под континентами. Один из примеров - горячая точка Йеллоустоуна на западе и центральной части Соединенных Штатов, а другой – ответственный за вулканический пояс Анахим в центральной части Британской Колумбии (Канада). Очевидно, что мантийные плюмы очень долгоживущие явления, длящиеся по крайней мере десятки миллионов лет, возможно в некоторых случаях, сотни миллионов лет.

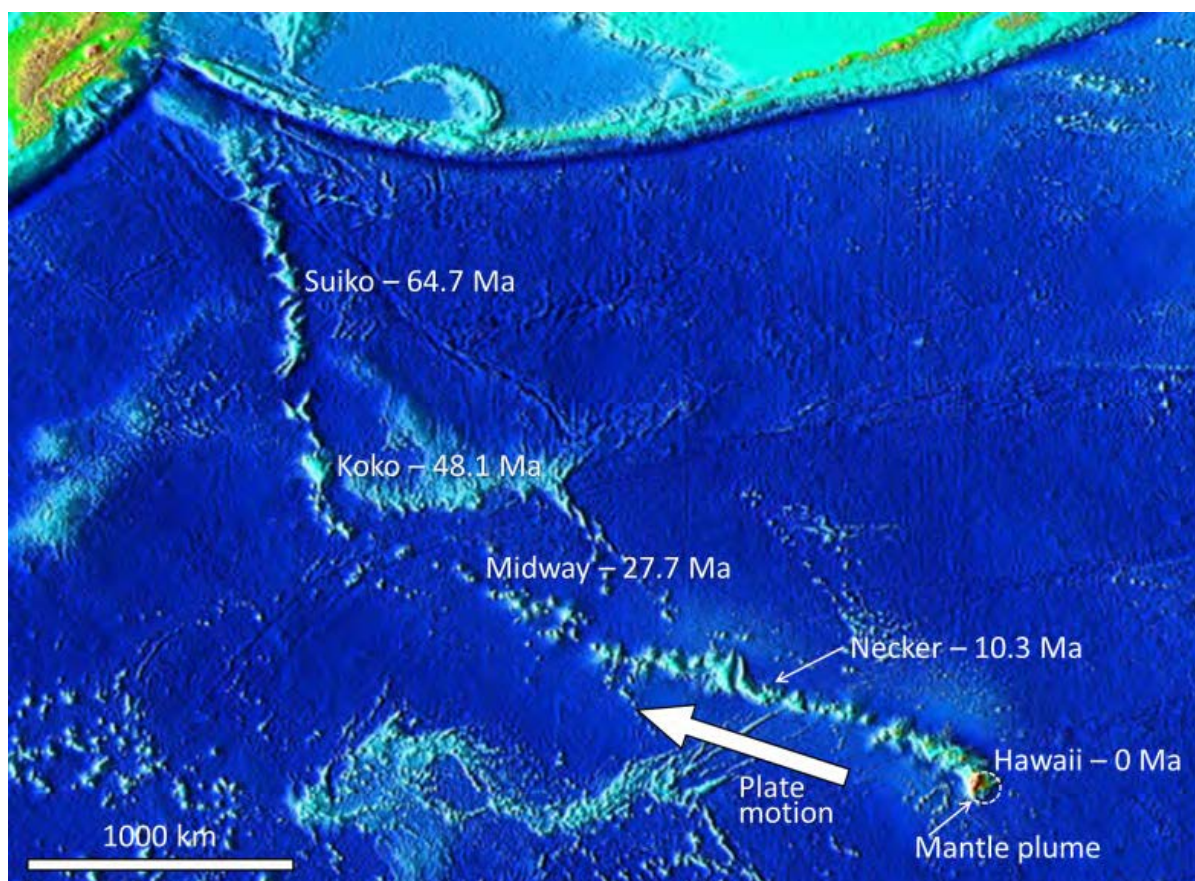


Рисунок 9 - Возраст Гавайских островов и Императорских гор по отношению к расположению гавайского мантийного плюма

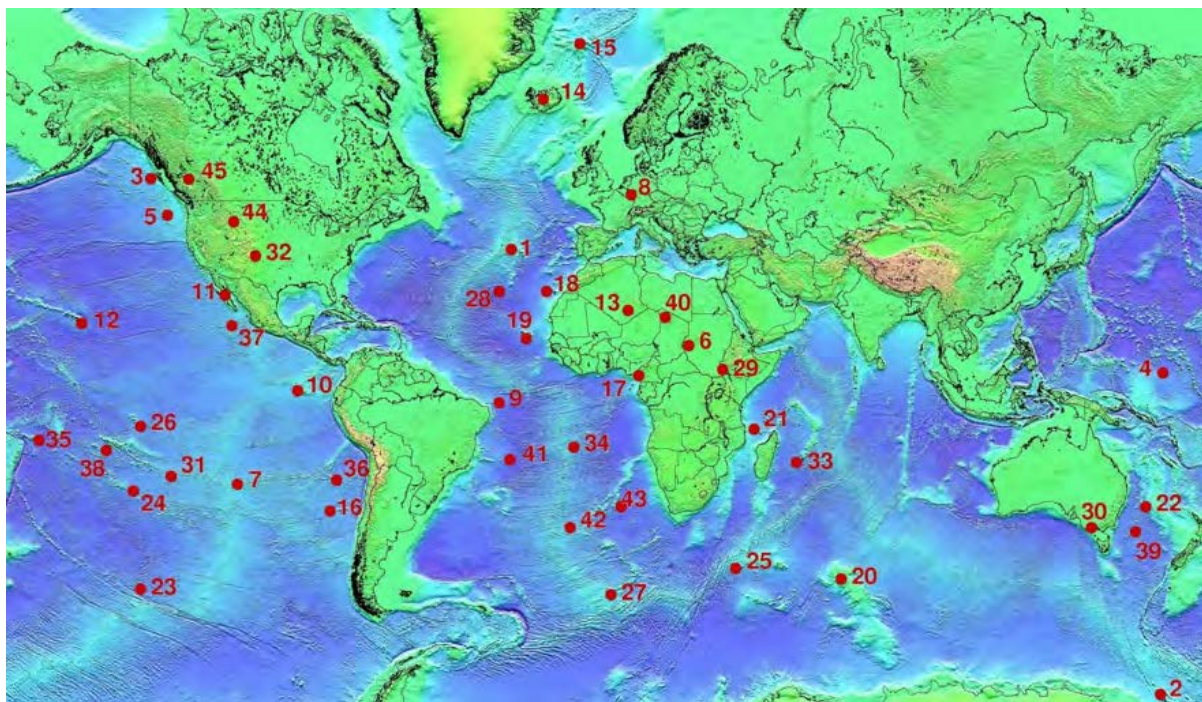


Рисунок 10 - Расположение мантийных плюмов. Избранные мантийные плюмы:
 1: Азорские острова, 3: Боуи, 5: Кобб, 8: Эйфель, 10: Галапагосские острова,
 12: Гавайи, 14: Исландия, 17: Камерун, 18: Канарские острова, 19: Кабо-Верде,
 35: Самоа, 38: Таити, 42: Тристан, 44: Йеллоустон, 45: Анахим

Плиты, движения плит и границы плит

К концу 1967 года поверхность Земли была разделена на серию плит. Основные плиты - Евразия, Тихий океан, Индия, Австралия, Северная Америка, Южная Америка, Африка и Антарктика. Также существует множество небольшие плит (например, Хуан де Фука, Кокос, Наска, Шотландия, Филиппины, Карибские острова) и много очень маленькие плит или микро-плит. Например, плита Хуана де Фука на самом деле состоит из трех отдельных плит (Горда, Хуан де Фука и Эксплорер), которые движутся в одном и том же направлении, но с несколько разной скоростью. Скорость движения основных плит колеблется от менее 1 см / год до более 10 см / год. Тихоокеанская плита самая быстрая, за ней следуют Австралийская плита и плита Наска. Североамериканская плита - одна из самых медленных, в среднем от 1 см / год на юге до почти 4 см / год на севере. Пластины движутся как твердые тела, поэтому может показаться удивительным, что Североамериканская плита может двигаться с разной скоростью в разных местах. Объяснение заключается в том, что пластины движутся вращательно. Например, Североамериканская плита вращается против часовой стрелки; Евразийская плита вращается по часовой стрелке.

Границы между пластинами бывают трех типов:

- дивергентные (т. е. расходящиеся),

- конвергентные (т. е. сходящиеся),
- трансформирные (движение вдоль вертикальных разломов соприкасающихся краёв плит).

Прежде чем говорить о процессах на границах плит, важно отметить, что пробелов между пластинами не бывает. Плиты включают в себя весь объем литосферы, а литосфера состоит из коры и самой верхней твердой части мантии (рисунок 11). Кора может быть тонкой, относительно плотной океанической корой или толстой, относительно плавучей континентальной корой. Несмотря на то, что тектонические плиты все время движутся, и движутся они в разных направлениях, между ними никогда не бывает каких либо значительных пустот. Считается, что плиты движутся по границе «литосфера-астеносфера», так как астеносфера является зоной частичного плавления. Предполагается, что относительная непрочность зоны частичного плавления способствует скольжению литосферных плит. Тот факт, что плиты включают как материал земной коры, так и материал литосферной мантии, позволяет единой плите состоять как из океанической, так и из континентальной коры. Например, Североамериканская плита включает большую часть Северной Америки (континентальная кора) плюс половина северной части Атлантического океана (океаническая кора). Тихоокеанская плита почти полностью океаническая, но она включает часть Калифорнии к западу от разлома Сан-Андреас.

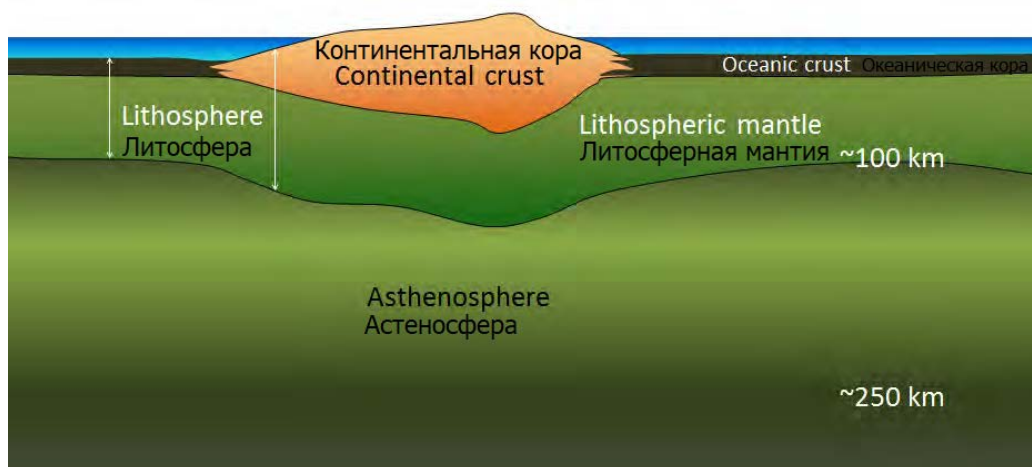


Рисунок 11 - Кора и верхняя мантия. Тектонические плиты состоят из литосферы, включающей кору и самую верхнюю (жесткую) часть мантии

Дивергентные границы

Дивергентные границы - это границы нарастания, где новая океаническая кора создается из магмы от частичного плавления мантии, вызванного декомпрессией, когда горячая мантийная порода смещается с глубины к поверхности (рисунок 12). Треугольная зона частичного плавления у гребня хребта дает океаническую земную кору мощностью около 6 км.

Большинство дивергентных границ расположены на океанических хребтах, хотя некоторые из них находятся на суше.

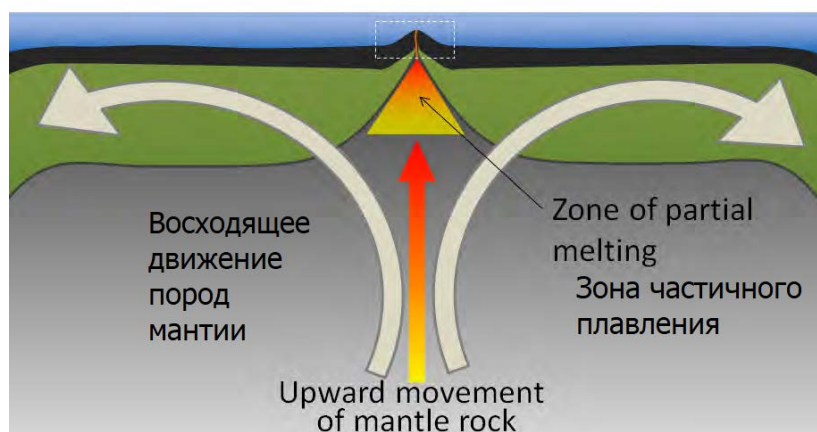


Рисунок 12 - Общие процессы, происходящие на дивергентной границе

Конвергентные границы

Конвергентные границы, где две пластины движутся навстречу друг другу, бывают трех типов в зависимости от присутствия океанической или континентальной кора по двум сторонам границы. Типы: океан-океан, океан-континент и континент-континент.

На сходящейся границе океан-океан одна из плит (океаническая кора и литосферная мантия) погружается под другую (**subducted**). Часто более старая и холодная пластина, как более плотная, опускается вниз под более молодую и горячую плиту. Вдоль границы обычно проходит океанский желоб. Значительный объем воды в погружающемся материале высвобождается при нагревании погружающейся плиты. Высвободившаяся вода поднимается и смешивается с вышележащей мантией. Добавление воды к горячей мантии снижает температуры плавления горных пород и приводит к образованию магмы (**плавлению пород - flux melting**) (рисунок 13). Магма, которая легче, чем окружающий материал мантии, поднимается через мантию и покрывающую ее океаническую кору до дна океана, где образуется цепочка вулканических островов, известная как **островная дуга**.

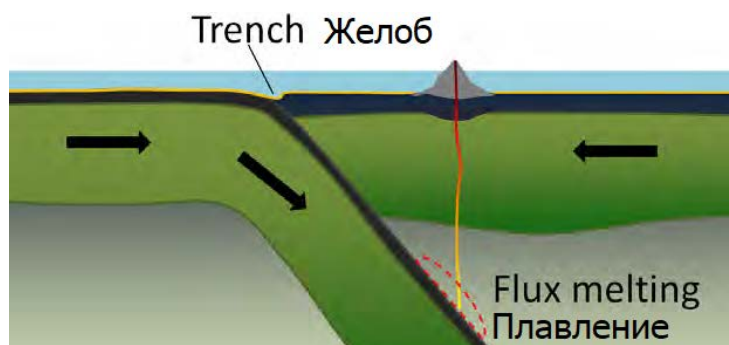


Рисунок 13 - Конфигурация и процессы конвергентной границе «океан – океан»

Как описано выше в контексте зон Беньоффа (рис. 6), землетрясения происходят вблизи границы между субдуцирующей корой (слэбом) и выше-лежащей корой. Самые сильные землетрясения происходят около верхней поверхности погружающейся пластины там, где она все еще холодная и прочная.

На конвергентной границе океана и континента океаническая плита погружается под континентальную плиту так же, как на границе океан-океан. Осадок, накопившийся в окрестности материка, утрамбовывается в аккреционную призму (accretionary wedge), а сжатие приводит к деформации внутри континентальной плиты (разломы надвигов показаны на рисунке 14). Основная магма, образовавшаяся в непосредственной близости от зоны субдукции, поднимается до основания континентальной коры и приводит к частичному плавлению земной коры. Образовавшаяся магма поднимается через кору, образуя континентальную дугу - цепь вулканов.



Рисунок 14 - Конфигурация и процессы конвергентной границе «океан-континент»

Столкновение континента с континентом происходит, когда континент или большой остров, который был перемещен вместе с субдуцирующей океанической корой, сталкивается с другим континентом (рисунок 15). При столкновении континентальный блок не будет погружен, потому что он слишком легкий и плавучий, но сросшаяся с ним океаническая часть плиты в конечном итоге отламывается и погружается в мантию. Происходят огромные деформации ранее существовавших континентальных горных пород и создание из них гор, а так же из любых отложений, скопившихся на берегах столкнувшихся континентов и, обычно, с некоторой долей материала океанской коры и верхней мантии.

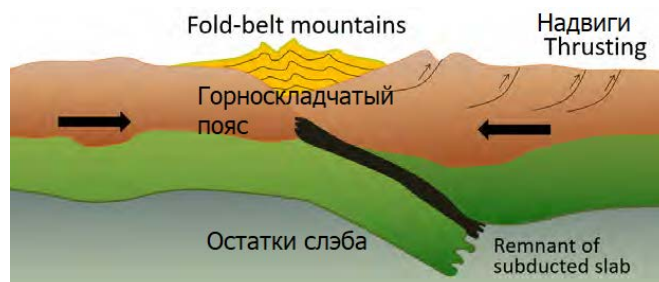


Рисунок 15 - Конфигурация и процессы конвергентной границы «континент – континент»

Трансформные границы

Трансформные границы существуют там, где одна пластина скользит мимо другой без новообразования или плавления материала коры. Хотя океанические срединговые хребты кажутся изогнутыми на поверхности Земли, на самом деле их гребни состоят из серии прямолинейных сегментов, смещенных по разломам, перпендикулярным к гребням (рисунок 16). В статье, опубликованной в 1965 году, Тузо Уилсон назвал эти линейные формы трансформационными разломами.

В то время как большинство трансформных разломов соединяют сегменты срединно-океанических хребтов и, таким образом, являются границами плит типа «океан-океан», некоторые трансформные разломы соединяют части континентальных плит. Примером может служить разлом Сан-Андреас (San Andreas Fault), который простирается от южной оконечности средингового хребта Хуан де Фука до северной оконечности Восточно Тихоокеанского средингового хребта в Калифорнийском заливе (рисунок 17). Часть Калифорнии к западу от разлома Сан-Андреаса и вся Нижняя Калифорния находятся на Тихоокеанской плите. Трансформные разломы иногда не соединяют дивергентные границы. Например, разлом Королевы Шарлотты идет от северного конца хребта Хуан де Фука, начиная с северной оконечности острова Ванкувер, до Алеутской зоны субдукции.

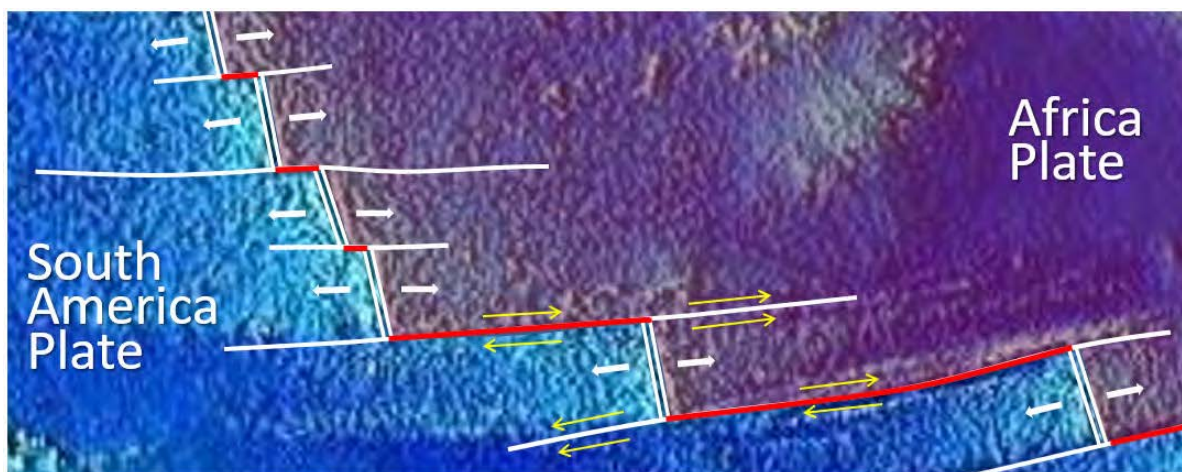


Рисунок 16 –
Часть Срединно-Атлантического хребта около экватора.

Двойные белые линии - срединговые хребты. Сплошные белые линии - зоны трещин.

Желтыми стрелками показано направления относительного движения плит по обе стороны от зон разрушения, оно может быть одинаковым (стрелки указывают одном направлении) или противоположными (стрелки указывают в противоположных направлениях).

Трансформные разломы (красные линии) находятся между сегментами хребта, где желтые стрелки имеют противоположные направления



Рисунок 17 - Разлом Сан-Андреас простирается на север от конца Восточно-Тихоокеанского хребта в Калифорнийском заливе до южной оконечности хребта Хуан де Фука. Все красные линии на этой карте показаны трансформные разломы

Задание I: Граничные характеристики плит (2 часа самостоятельно и 2 часа аудиторно)

В этом упражнении вы научитесь определять типы границ плит на основе их характеристик. Это задание основано на задании Дейла С. Сойера «Открытие границ плит» из Университета Райса и изменено на основе опыта преподавания на отделении SEOS Университета Виктории, Канада.

Сегодня в группах мы рассмотрим пять типов границ плит:

- Дивергентная «океан - океан» (граница между двумя плитами, где океаническая кора наращивается)

- Конвергенная «океан - океан» (где две плиты океанической коры движутся навстречу друг другу, приводя к субдукции одной из плит)
- Конвергенная «океан – континент» (где океаническая и континентальная кора движутся навстречу друг другу, приводя к субдукции океанической коры)
- Конвергентная «континент-континент» (где сталкиваются две плиты с континентальной корой)
- Трансформная «океан – океан» (когда через трансформный разлом участки плит океанической корой движутся горизонтально в противоположных направлениях)

Для начала скачайте или просмотрите карту границ плит (рисунок 18). На карте выделены и пронумерованы семь границ плит. Каждому из вас будет назначен слой `Dynamic_Earth`, отображающая один из четырех наборов данных: вулканы, землетрясения, топография/батиметрия и возраст морского дна.

Каждый из вас индивидуально изучит в `Google Earth Pro` свой слой с набором данных и попытается сделать выводы о том, какие геологические особенности и процессы характеризуют каждую из пронумерованных границ плит. Позже на лабораторных занятиях в небольших группах вы присоединитесь к видеоконференции в режиме реального времени или встретитесь в аудитории, чтобы поделиться своими наблюдениями со своими товарищами по группе. Вам будет предложено обобщить ваши наблюдения, поэтому запишите свои выводы и будьте готовы учить своих сверстников!

Шаг 1

Изучите назначенную карту. Начните с определения местоположения всех пронумерованных границ плит на назначенной карте. Находятся их легко или сложно найти? Внимательно изучив свой тип данных, начните делать заметки о пространственном распределении точек данных. То, что вы ищете, будет зависеть от типа данных. Для точечных данных (вулканы и землетрясения) вы ищете закономерности распространения. Для данных о поверхности (топография и возраст морского дна) вы ищете, где поверхность высокая, а где низкая, где старая, а где молодая. В этой деятельности вы сосредотачиваетесь на наблюдениях, а не на интерпретациях, что означает, что вам не нужно беспокоиться о том, почему есть или нет закономерность, вам просто нужно наблюдать и записывать то, что вы видите. Вы анализируете данные, а не их интерпретация!

Шаг 2

Теперь сосредоточьтесь на пронумерованных границах плит на карте (рисунок 18). Определите характерные особенности ваших данных рядом с каждой из пронумерованных границ плит. Это высокий или низкий, симметричный или асимметричный, отсутствует или присутствует, изменяется ли свойство вдоль границы или его значение вдоль границы посто-

янное и т. д. Заполните таблицу 1 ниже, чтобы классифицировать границы плит на основе ваших наблюдений по доступным вам данным, используя подсказки ниже для руководства. Прямо сейчас вам нужно только заполнить столбец для назначенного вам признака. Помните: не попробуйте объяснить данные; просто наблюдайте!

Ниже приведены некоторые предложения по видам наблюдений, которые могут быть полезны для каждого набора данных. Сравните ваши границы для типов границ на карте, когда вы это делаете. Помните, цель - найти уникальные характеристики для каждого типа границ.

Вулканы: наблюдайте и делайте заметки о закономерностях распространения. Находятся ли вулканы рядом с заданной границей, случайно распределены, плотно сгруппированы или имеют линейный тренд?

Землетрясения: наблюдайте и записывайте характер распределения и глубину землетрясений. Примечание: записывайте как диапазон глубин (крайних значений), так и более типичные или средние. Например, данная граница может иметь все мелкие землетрясения (0-33 км) с редкими более глубокими землетрясениями на глубине 33-70 км. Землетрясения могут быть случайным образом распределены, плотно сгруппированы или могут определять линейный тренд.

Топография / батиметрия: ищите любые топографические объекты, которые кажутся связанными с границей, такие как близлежащие горные цепи, глубоководные желоба, широкие постепенные подъёмы или падения, смещение (разорванные и смещенные) особенности и т. д. Кратко опишите, насколько они экстремальны (например, очень высокая или широкая горная цепь). Убедись, что вы понимаете, как цветовая шкала на карте отображает высоту над уровнем моря. Например, вы должны понимать, что интенсивные синие цвета соответствуют большим отрицательным значениям и представляют самые глубокие части океана, где морское дно намного ниже уровня моря.

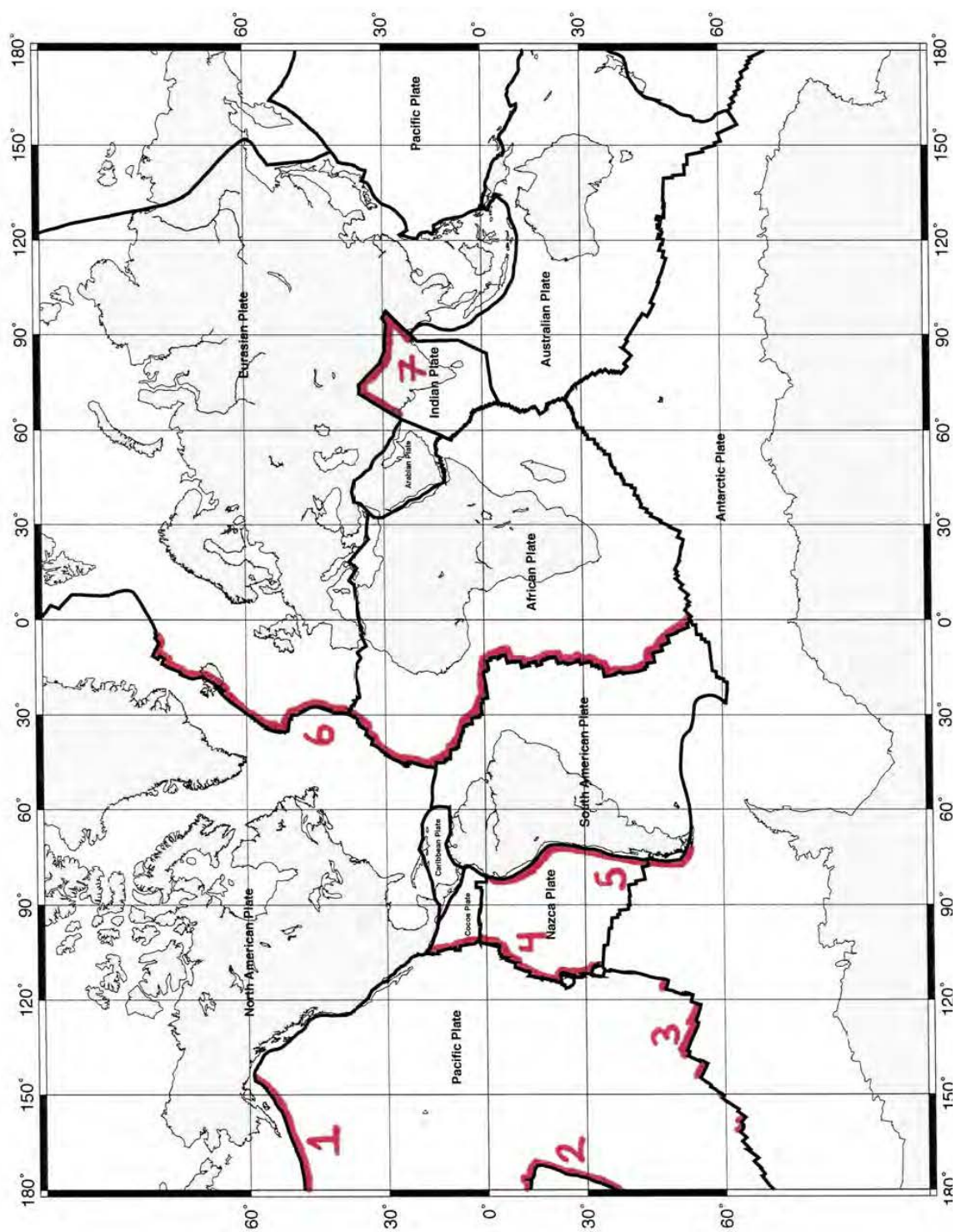


Рисунок 18 - Контурная карта мира

Таблица 1

Обобщите ключевые характеристики из каждого набора данных, которые характеризуют каждый тип границ плит

Тип границы	Вулканизм	Землетрясение актив- ность	Батиметрия / топография	Возраст морского дна
Океан-Океан Конвергентная (# 1 и # 2)				
Океан-Океан Трансформная (# 3)				
Океан-Океан Дивергентная (# 4 и # 6)				
Океан-Континент Конвергентная (# 5)				
Континент-Континент Конвергентная (# 7)				

Возраст морского дна: этот набор данных может быть непростым; будьте осторожны, чтобы не увидеть узоров там, где их нет! Например, вы можете заметить, что в некоторых местах возраст морского дна пятнисто меняется вдоль границы. В этом случае нет четкой закономерности, и это указывает на отсутствие связи между возрастом морского дна и границей, но это все тоже хорошее наблюдение! С другой стороны, возраст морского дна может быть одинаковым повсюду вдоль границы, или он может меняться в соответствии с некой закономерностью. Постарайтесь описать то, что вы видите, или то, что ваши наблюдения не укладываются в четкую и последовательную схему.

Шаг 3

Все вы были случайным образом распределены в группы и получили ссылку на видеовстречу или приглашение на встречу, чтобы обсудить ваши наблюдения в реальном времени группами по четыре человека. В каждой группе есть, по крайней мере, один представитель каждого набора данных. Вы являетесь группой экспертов для сравнения наблюдений. Представьте в своей группе: какой тип данных вы анализировали. По очереди каждый член группы поделится своими наблюдениями о назначенном им наборе данных из шага 2. Во время обучения полезно показывать свой экран, чтобы члены вашей группы могли видеть ваши данные. Если вы не знаете, как продемонстрировать свой экран, спросите своего инструктора. Ваш инструктор будет периодически присоединяться к каждой из групповых видеовстреч, пока вы выполняете это часть задания.

Работайте вместе в своей группе, чтобы заполнить таблицу 1, суммируя свои наблюдения по характеристикам каждого типа границы плит. К концу этого упражнения каждый член вашей группы должен иметь заполненную таблицу. Каждый член группы должен уметь описывать характеристики каждого типа граница плит с использованием всех четырех типов данных.

Обсуждение

Подведем промежуточные итоги первого знакомства с планетой Земля. Её пять материков разделены океанами, посреди океанов возвышаются подводные хребты, в центре которых в зоне спрединга постоянно зарождается новая океаническая кора. Наиболее отчетливо этот процесс отражает карта возраста морского дна, представленная в слое «Seafloor age». На бумаге эта карта всегда представлена в двухмерном изображении (рисунок 19). У нас есть возможность повращать Землю и хорошенько всё разглядеть.

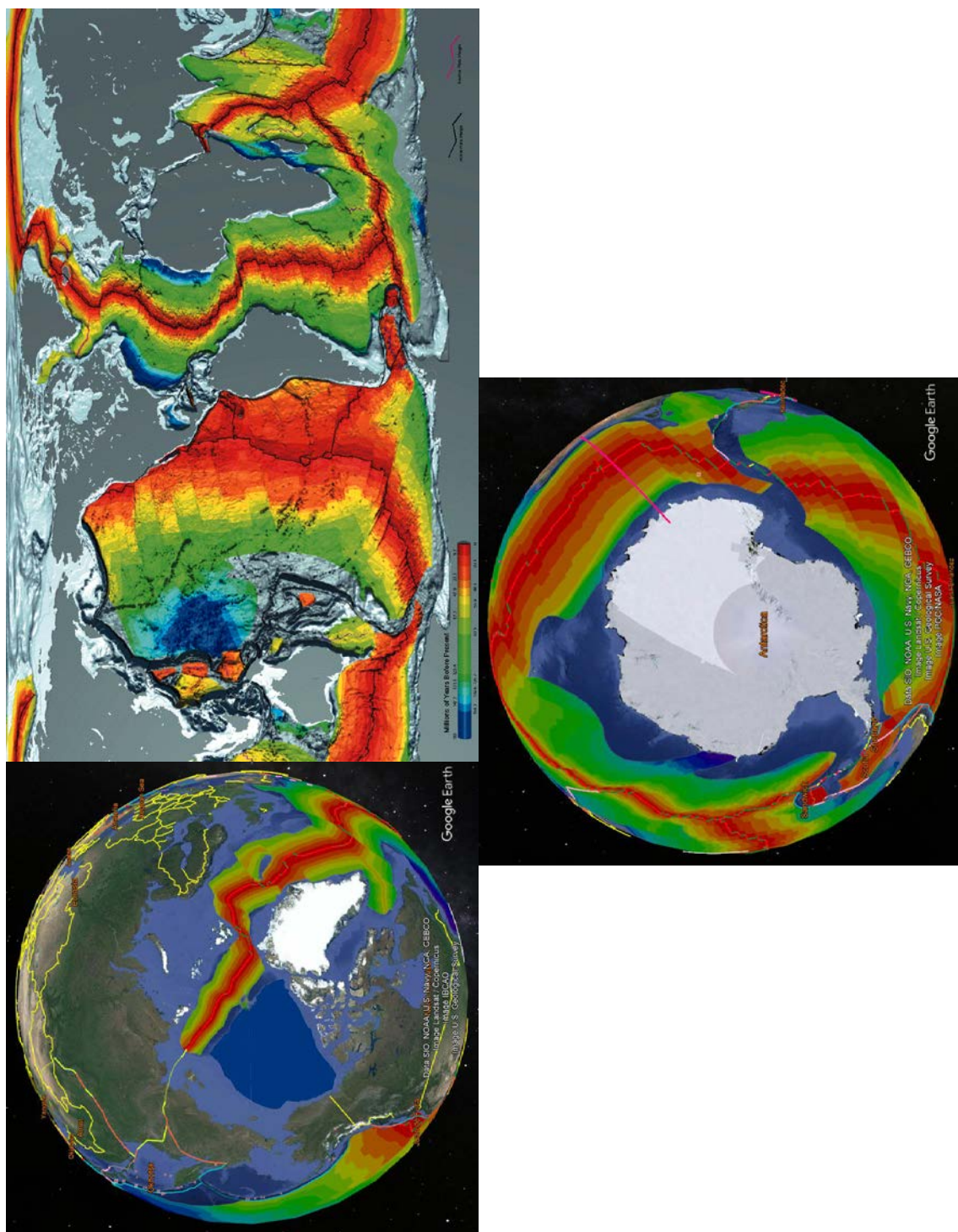


Рис. 19 Карта возраста океанической коры в цилиндрической развертке и изображения той же карты на полярных областях глобуса.

Начнем с самого знаменитого Срединно-Атлантического хребта. Он «начинается» в южной Атлантике и протягивается на север через весь океан, и далее через Арктику до моря Лаптевых. Повращав глобус, можно убедиться, что это единая дивергентная зона естественным образом подразделяется на участки с различающимся поведением изохрон дна, то есть, с различной динамикой его формирования. Убедиться в обоснованности проведения изохрон очень просто: достаточно попеременно включать в Google Earth слои «Seafloor age»- возраста и «EMAG2: Earth Magnetic Anomaly Grid» - магнитных аномалий морского дна (рисунок 20)

Вторая глобальная дивергентная зона протягивается от внутриконтинентального рифта Красного моря, через Индийский океан, между Австралией и Антарктидой и далее через Тихий океан до Калифорнийского залива (Индийский и Восточно-Тихоокеанский хребты).

Третья глобальная зона включает Чилийский и Южно-Индийский хребты, таким образом, замыкая вторую глобальную зону самое на себя через тройники ответвления боковых хребтов (зон спрединга). Таким образом, Австралия со всех сторон окружена кольцевой зоной спрединга и как континент практически всюду имеет пассивные окраины. Начиная с пермского периода материк Антарктида в его нынешних границах сохранял своё субполярное положение, поэтому его часто используют в качестве неподвижной точки опоры при геодинамических построениях мезозоя и кайнозоя. И в настоящее время Антарктида имеет наименьшую подвижность среди всех материков (рисунок 21).

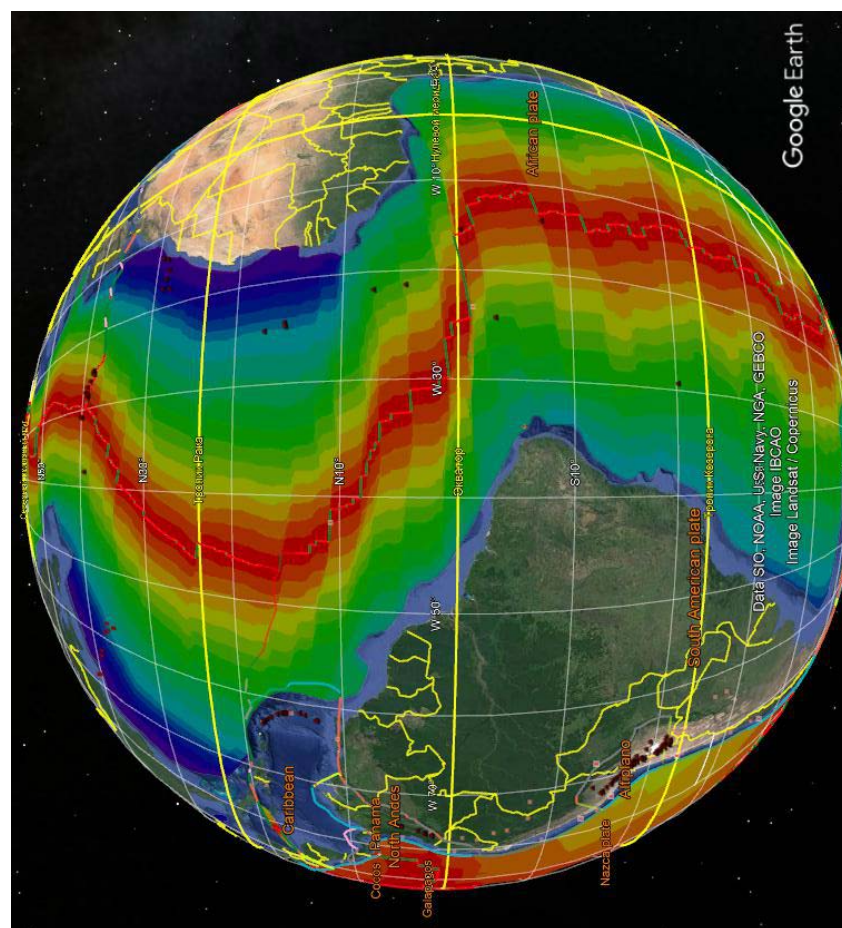
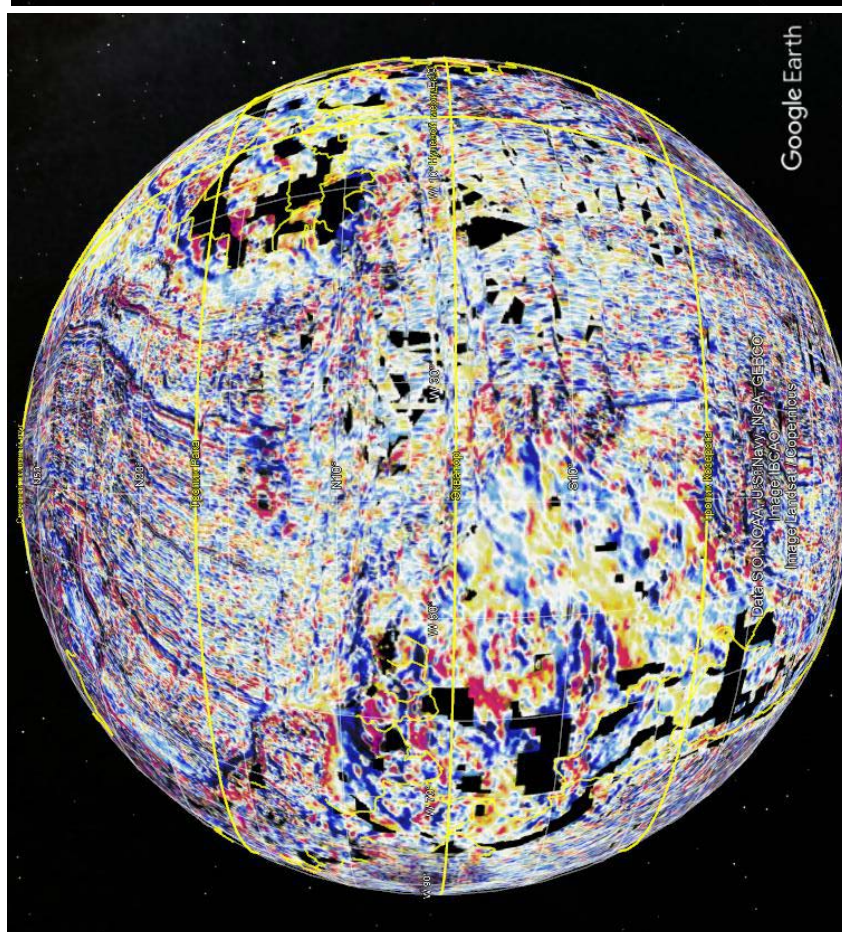


Рис. 20 Взгляд на аномалии магнитного поля (слой «EMAG2: Earth Magnetic Anomaly Grid») и возраст дна (слой «Seafloor age») Атлантического океана.

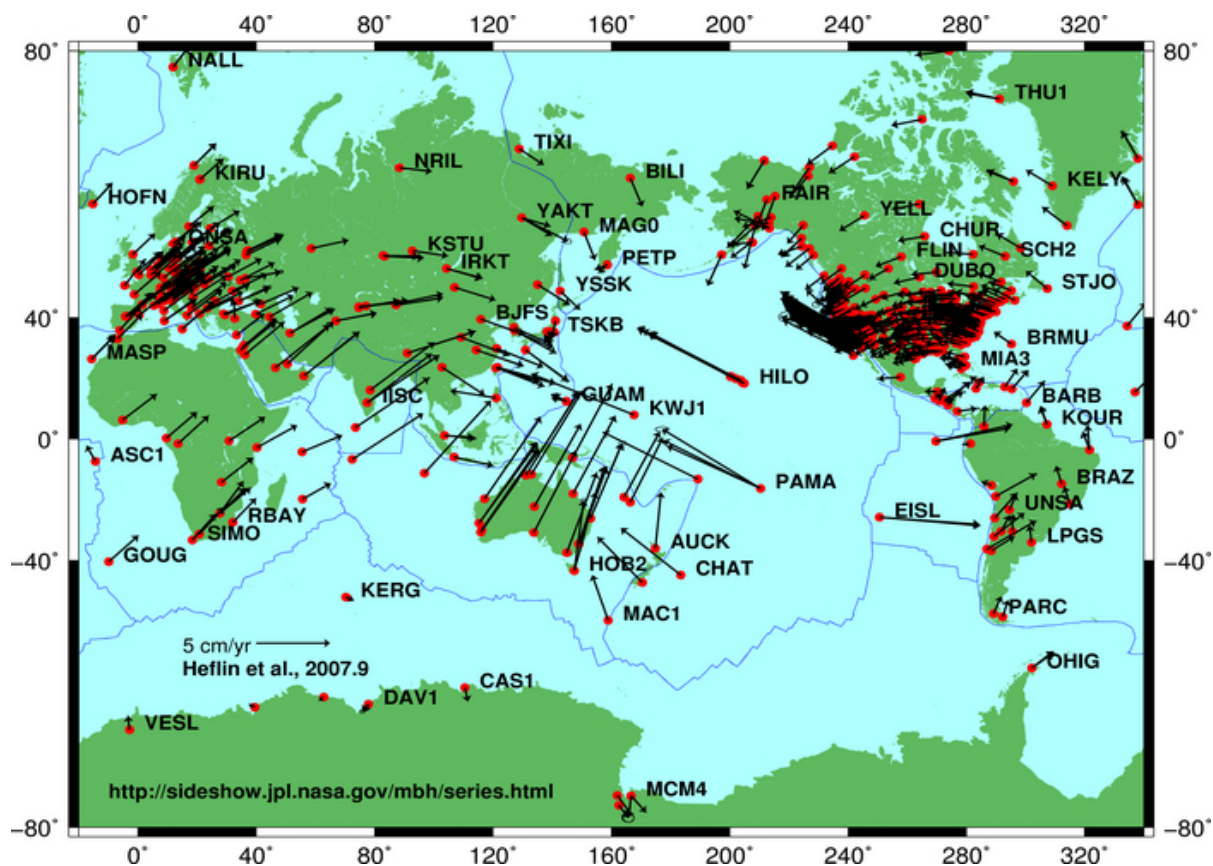
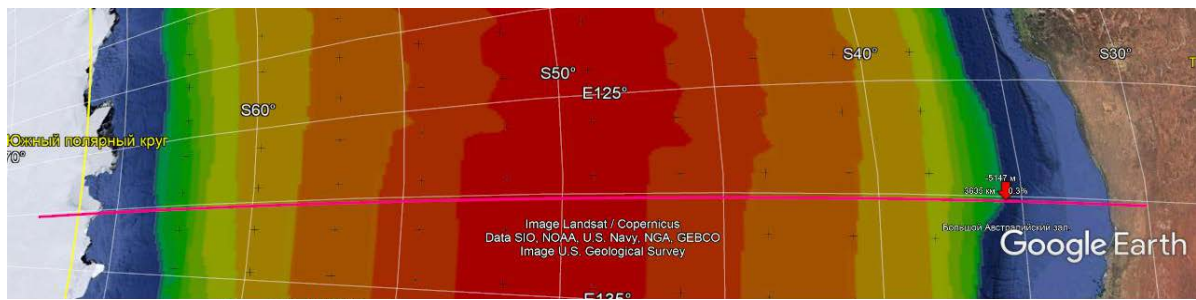


Рисунок 21 - Карта векторов смещения пунктов наблюдения глобальной сети (Global Positioning System-GPS) по данным NASA (http://en.wikipedia.org/wiki/Plate_tectonics)

Определение скорости относительного перемещения двух плит

Образец выполнения.

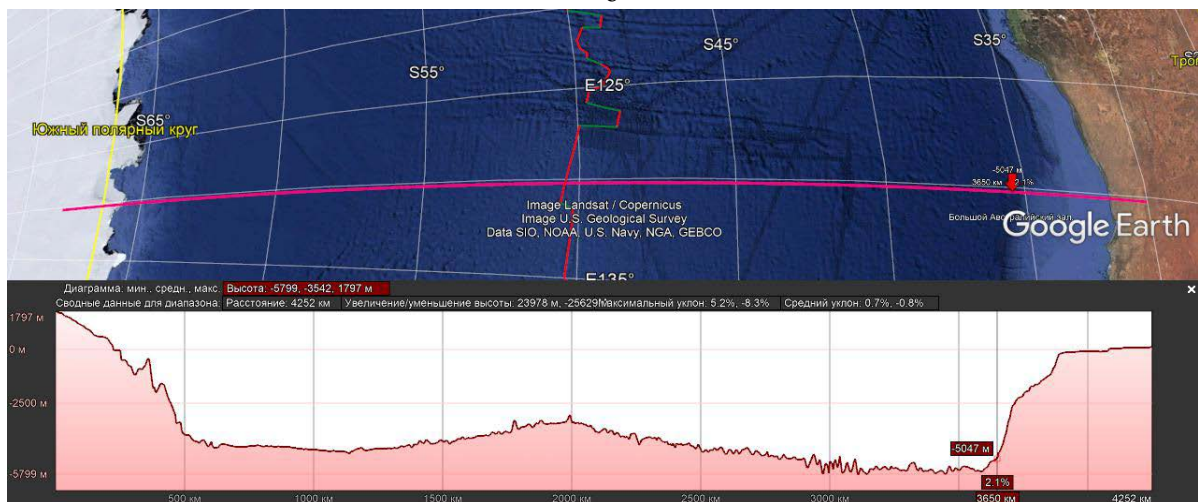
Для выполнения этой работы вполне достаточно одного инструмента «Путь». Проложим свой путь от берегов Антарктиды до Австралии параллельно 130-му меридиану (Рисунок 22в). Профиль рельефа дна получим заданием параметра на закладке «Путь» или через меню. Посмотрим на сколько согласованы между собой аномалии магнитного поля и рисовка изохрон возраста морского дна (слои «EMAG2: Earth Magnetic Anomaly Grid» и «Seafloor age», рисунок 22б и 22а). Убедившись в надежности рисовки изохрон, приступаем к основной части задания.



а



б



в

Рисунок 22

Профиль океана между Антарктидой и Австралией.
а - возраст морского дна, б - карта аномалий магнитного поля,
в - батиметрия, профиль рельефа дна и его классификация

Шаг 1

Оценим насколько четко выражены на обоих берегах морфологические элементы пассивных континентальных окраин:

- **Шельф** – до глубины 200 м, уклон – десятые доли процента;
- **Континентальный склон** – с уклонами от 1 до 10 процентов;
- Пологое континентальное основание (continental rise) с уклонами до 0.01 процента - океаническое дно, покрытое и сглаженное осадками турбидитных потоков и оползней.

Профиль дна австралийского континента имеет шельф шириной около 200 км и континентальный склон, осложненный террасой. А рельеф континентального основания слабо выравнен осадками и несет в себе отражение полосчатой структуры океанической коры.

Профиль дна Антарктиды еще менее сглажен осадками: шельф практически отсутствует, континентальный склон имеет сложный рельеф, наиболее вероятно, наследует формы рифта расщепления суперконтинента Пангея на Антарктику и Австралию. Судя по наибольшему возрасту океанической коры, возраст рифта более 80 млн лет.

Шаг 2

Заготовим рабочий лист в программе Excel (рисунок 24).

- Приготовим столбцы таблицы для порядкового номера точки, ее расстояния от начала профиля пути (L), взятый из легенды карты перечень полос карты возрастов морского дна (голубой 1, 2 и т.д.) и возраста изохрон в млн лет (T), глубина моря в точке пересечения изохрон и профиля (H).

- Взять из легенды слоя возраста изохрон и внести их в строки таблицы.

- Заготовить график, вставив на лист точечную диаграмму, над колонками L, T, H (на рисунке в правом верхнем углу).

- Активируем слой **Seafloor age** в **Google Earth Pro**, переходим курсором на рисунок профиля рельефа. Если рельеф отображается линией с нулевой глубиной, то в слоях (нижний левый угол) включить опцию «Рельеф».

- Перемещая курсор вдоль профиля дна, добиваемся совпадения синхронной стрелки-указателя на карте с очередной изохроной. Считать в поле профиля расстояние курсора от его начала и текущую глубину моря, вписать эти данные в соответствующую строку таблицы Excel. Если стрелка «прячется» под карту возраста дна, то её можно заменить визуализацией отрезка пути. На профиле глубин нажмите на левую (рабочую) клавишу и удерживая её перемещайте курсор вдоль профиля. Участок зажатого перемещения отобразится на карте красной жирной чертой. Ровняйте её окончание на пересечении линии профиля и изохроны.

- Провести визуальный контроль введенных данных на точечной диаграмме.

- Последовательно заполнить все строки таблицы.

Точечная диаграмма должна в общих чертах повторять профиль рельефа. Используя формулы Excel,

- вычисляем средний возраст интервала между изолиниями,
- вычисляем расстояния между соседними изолиниями и оцениваем среднюю скорость наращивания океанической коры в км/млн лет (шаг изолиний 10 млн лет),

- строим точечные диаграммы зависимости от возраста глубины моря и скорости наращивания коры (нижние графики на рисунке 23).

А теперь перейдем к выполнению лабораторной работы.

№ п\п	L	Цвет	T	H	Тер	V
1	518	Г0	80	-4033		
2	565	Г1	70	-4219	75	4,7
3	652	31	60	-4387	65	8,7
4	736	32	50	-4497	55	8,4
5	884	Ж1	40	-4490	45	14,8
6	1080	Ж2	30	-4691	35	19,6
7	1399	О1	20	-4434	25	31,9
8	1736	О2	10	-3882	15	33,7
9	2030	ЦЕНТР	0	-3399	5	29,4
10	2312	О2	10	-4111	5	28,2
11	2682	О1	20	-4563	15	37,0
12	3063	Ж2	30	-5567	25	38,1
13	3313	Ж1	40	-5322	35	25,0
14	3422	32	50	-5627	45	10,9
15	3483	31	60	-5606	55	6,1
16	3596	Г1	70	-5610	65	11,3
17	3642	Г0	80	-5113	75	4,6

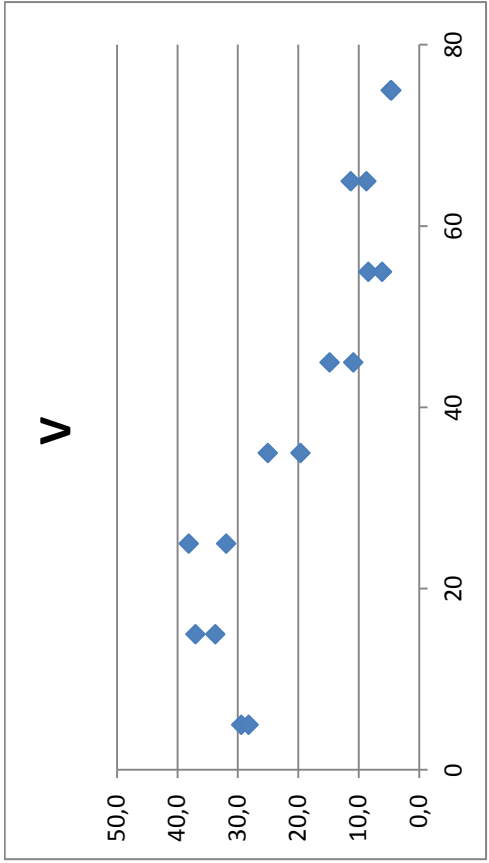
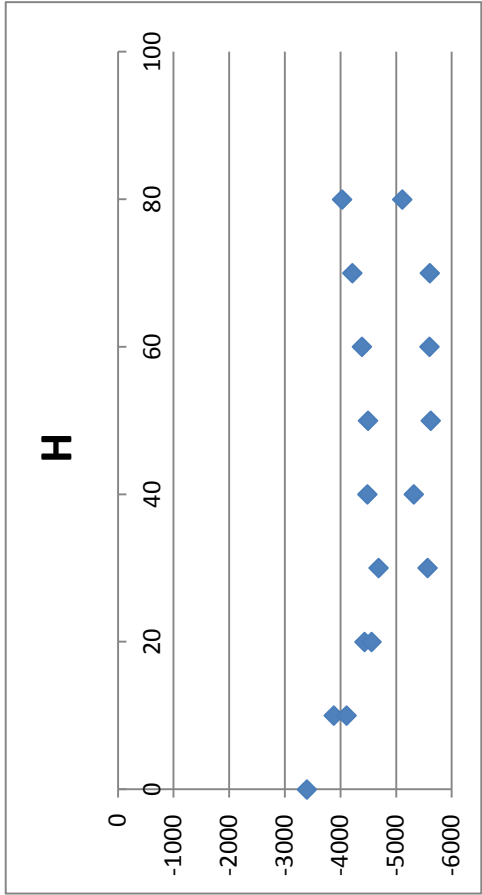
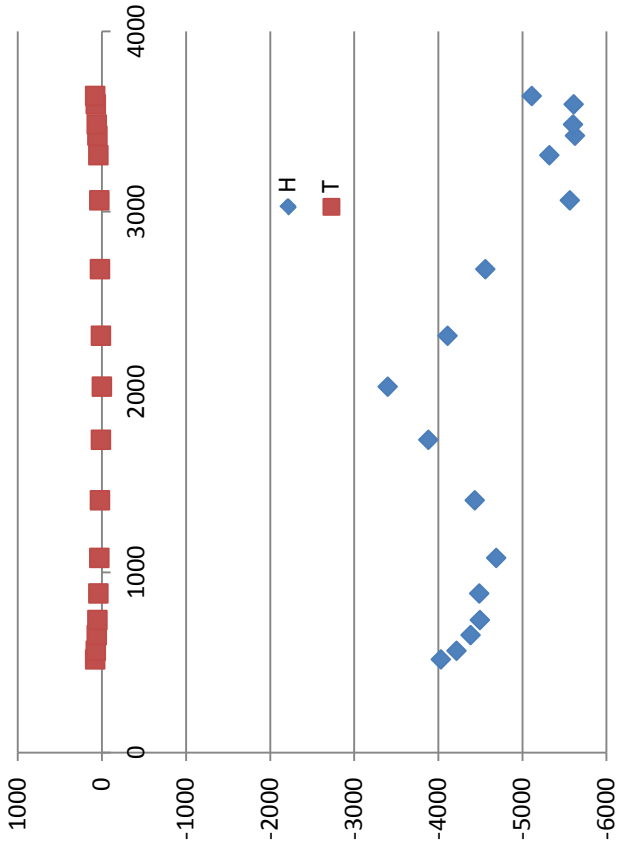


Рисунок 23 - Рабочая книга описания профиля («Пути») Антарктида-Австралия вдоль 130 меридиана

Задание 2 Скорость наращивания коры в зоне спрединга (2 часа самостоятельно)

- Координаты вариантов начальной и конечной точек профиля приведены в таблице 1. Воспользуемся инструментом «Путь» для получения точного профиля между начальной и конечной точками. Сохраним его в рабочей папке, и по всплывающему меню выберем опцию «профиль рельефа», если при его построении эта опция не была вами задана в диалоговом окне «Путь». **Примечание:** Точки начала и окончания пути удобно предварительно закрепить на глобусе в виде меток, воспользовавшись окном «Поиск» в левом верхнем углу. Например, южный конец профиля рис. 23 может быть найден после ввода в поисковое окно строки «-68 00 00 131 40 00», где минус означает южную или западную координату, а цифры, разделенные пробелами: ГГГ ММ СС ГГГ ММ СС – градусы, минуты и секунды координат широты и долготы. Путь и его профиль рельефа надёжней строить на чистом глобусе без дополнительных слоёв, которые добавляются позже.

- Сохраните (Ctrl+Alt+C или «Меню-Редактировать-Копировать изображение») и перенесите в отчет картинки карт батиметрии, возраста и магнитных аномалий. На профиле отметьте зоны континентальных шельфа, склона и основания, срединно-океанического хребта и его рифта (например – стрелкой).

- Найдите в папке «Dynamic_Earth» раздел «20 years of large earthquakes» или «30 years of eq's M = 5.0 +» и включите отображение на глобус эпицентров крупных землетрясений. В каких из выделенных вами зон они расположены в окрестностях профиля? Свои объяснения подтвердите копией изображения.

На рабочем листе Excel постройте графики, описанные во введении этой работы. Оцените время опускания океанической коры за счет её остывания. Опишите словами полученные вами результаты. **Устный счет.**

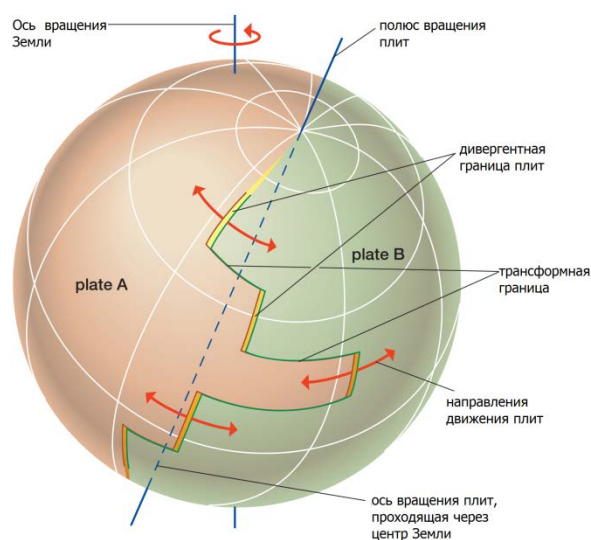
Одной из туристических достопримечательностей Исландии является мост из Европы в Америку (рис. 24). Мост перекинут над центральной расщелиной рифта Срединно-Атлантического хребта. Общая длина его конструкции – 19 метров. Через сколько лет мостовой пролет придётся удлинять?



Рисунок 24 - Исландия, мост из Европы в Америку Фото со страницы - <https://arenophile.livejournal.com/15675.html>

Динамика и геометрия перемещения плит

Тектонические плиты являются самой верхним и относительно тонким



© 2012 Encyclopædia Britannica, Inc.

Рисунок 25 - Геометрия взаимного перемещения плит, разделенных дивергентно-трансформной границей

слоем Земного шара, поэтому их перемещения хорошо описываются геометрией сферы.

Согласно теореме Эйлера любое перемещение точки по поверхности сферы описывается как чистое вращение вокруг оси, проходящей через центр сферы и пересекающей ее поверхность в двух точках (эйлеровых полюсах). Определив полюса Эйлера, можно построить сетку меридианов и параллелей. Точка, движение которой описывают эти полюса вращения, всегда движется вдоль эйлеровых параллелей и, соответственно, перпендикулярно эйлеровым меридианам.

В терминах теоремы Эйлера могут быть описаны и взаимные перемещения двух тектонических плит. Как вы уже знаете, на вершине срединно-океанического хребта есть рифт - узкая зона плавления магмы и наращивания океанической коры (дивергентная граница). Рифты локально прямолинейны, но разбиты на сегменты перпендикулярными к ним трансформными разломами (рисунок 25). Вместе дивергентные границы-рифты и трансформные разломы образуют сетку эйлеровых меридианов и парал-

лелей взаимного перемещения двух разделенных ими тектонических плит (рисунок 26а). Это даёт нам возможность простого геометрического оценивания положения полюса Эйлера для относительного перемещения двух разделенных такой границей плит. На рисунке 26а показано два способа оценки эйлеровых меридианов: продолжение геодезическими прямыми осей дивергентных границ (сплошная линия) и построение геодезических перпендикуляров к линиям трансформных разломов (пунктир).

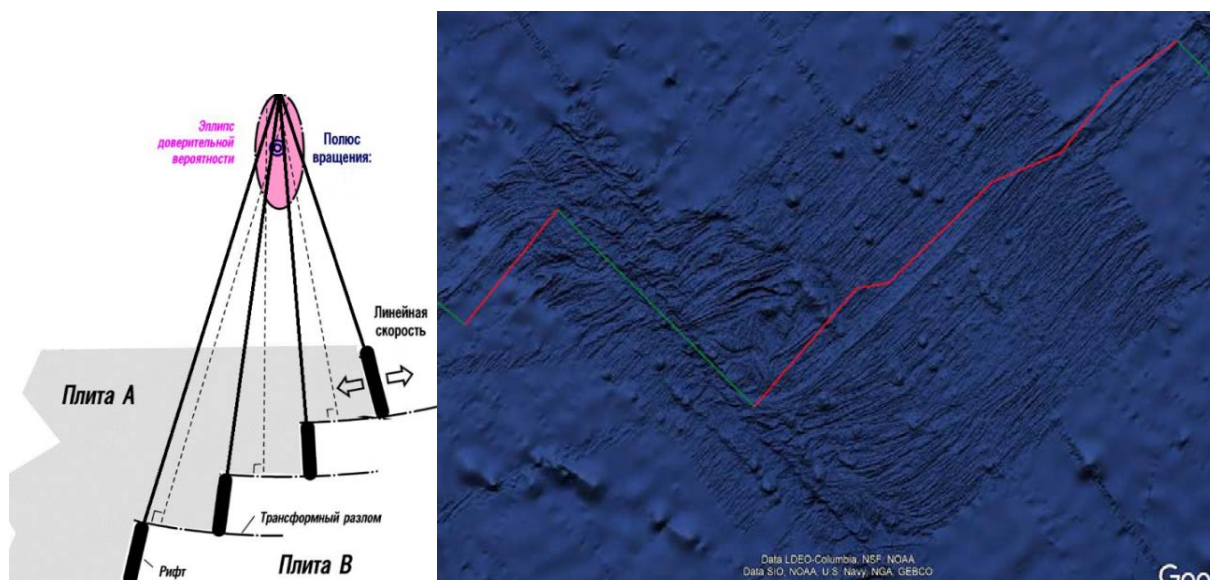


Рисунок 26 а - Графическое определение полюса вращения двух плит, разделенных дивергентно-трансформной границей (по Аглонов, 2001 [1] с добавлениями), б - высокоточная батиметрия Восточно-Тихоокеанского хребта в зоне трещиноватости Уилкса (Wilkes fracture zone)

Неоднозначность построений возникает из-за неточности измерения изучаемых поверхностей и полей Земли, неоднозначности их интерпретации и отклонений реальной среды от идеальных моделей. Воочию убедиться в масштабности таких отклонений можно на примере Восточно-Тихоокеанского хребта (рисунок 26б). Достаточно сравнить текущую картину рельефа с границами, проведенными до появления высокоточной площадной батиметрии. Вам будет полезно также просмотреть в крупном масштабе ось хребта на всём его протяжении, чтобы оценить обилие локальных вулканических цепочек, порожденных коротко живущими локальными горячими точками. Милые «пупырышки» на карте на поверку оказываются вулканическими конусами, возвышающимися на полтора-два километра.

Трансформные разломы и зоны трещиноватости в западной и юго-западной частях Тихого Океана своей изогнутостью наглядно показывают изменчивость процессов наращивания океанической коры в кайнозой (от 0 до 80 млн лет, рис.). По современному положению зон спрединга и современным трансформным разломам мы можем относительно достоверно оценить положение полюса взаимного вращения плит в четвертичное

время. Попытка уточнить их положение построением дополнительных перпендикуляров к более древним периферическим частям зон трещиноватости может не улучшить результат, а внести дополнительные помехи. Этот момент необходимо помнить при геометрической оценке положения **всех** полюсов вращения, и восстанавливать перпендикуляры только к современным трансформным разломам, соединяющим сегменты дивергентной границы, а не к их продолжениям – зонам трещиноватости.

А теперь разберём пример оценки положения полюса вращения Индийской и Сомалийской плит (рисунок 27).

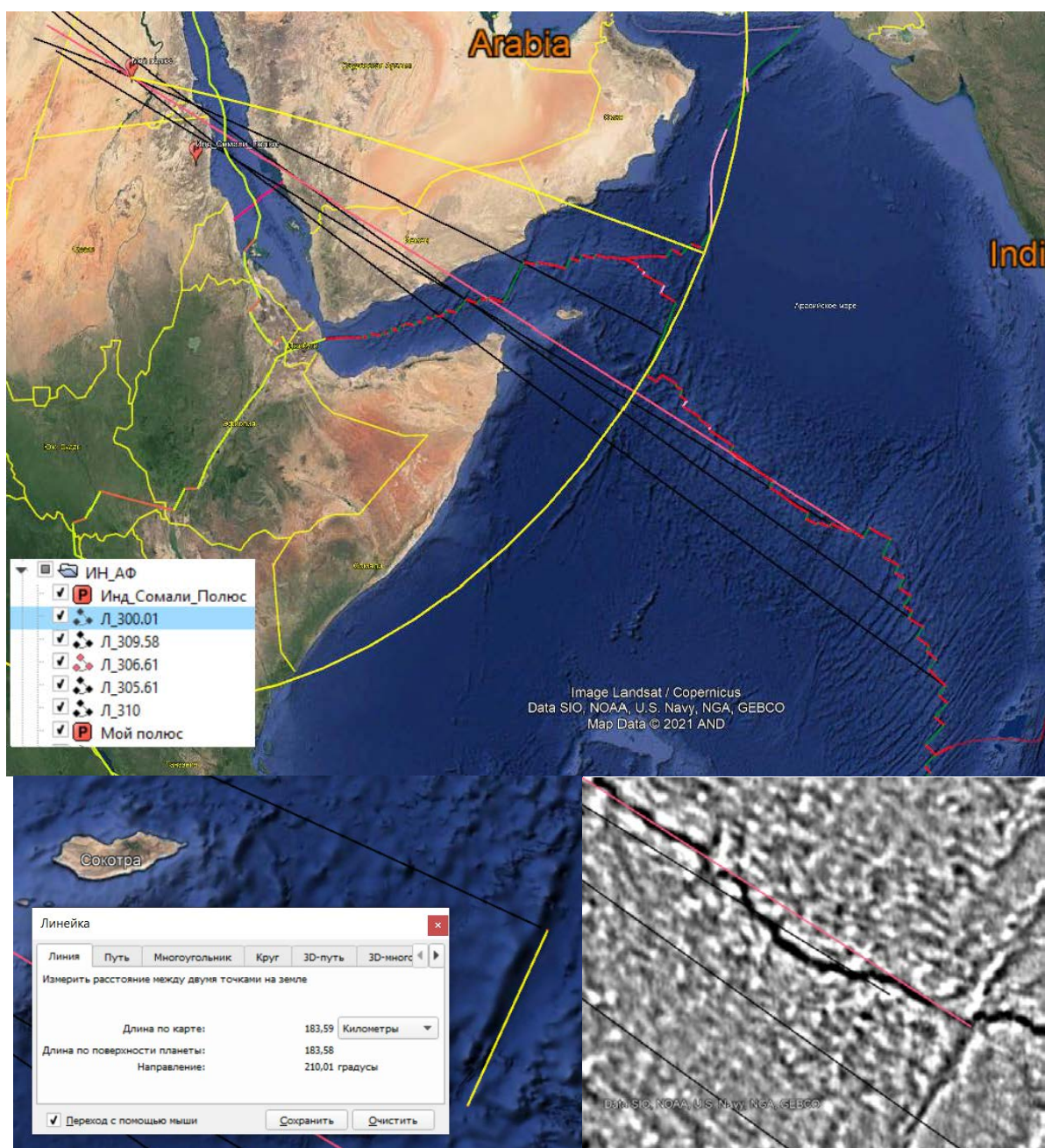


Рисунок 27 - Графическое нахождение полюса Эйлера взаимного перемещения Сомалийской и Индийской плит. Вверху – проверка результата, на врезке организация рабочей папки, внизу слева – замер азимута трансформного разлома, справа – проведение меридиана вращения по аномалиям градиента гравитационного поля

- На карте рельефа дна выберем несколько ярко выраженных трансформных разломов, равномерно распределенных вдоль границы плит.
- В центре трансформного разлома при помощи «Линейки» замеряем азимут его простирания, прибавляем к нему $\pm 90^\circ$ и из той же точки протягиваем перпендикуляр (в примере $210.01 + 90 = 301.01$, протягиваем и сохраняем самую верхнюю черную линию Л_300.01). Аналогично строятся ещё три линии.
- Анализируем карту градиента гравитационного поля, выявляем присутствие аномалий над горячими породами зоны спрединга, проводим меридианы вращения по оси аномалии (лиловая линия Л_306.61)
- «На глаз» выбираем центр пересечения линий и обозначаем его меткой «Мой_полюс» вращения.
- Проверка расположения полюса осуществляется визуально построением круга с центром в точке «Мой_полюс» (закладка «Круг»). Просматриваем и описываем степень согласования дивергентных границ с радиусом и трансформных с окружностью. (Посмотреть в <https://www.ngdc.noaa.gov/gazetteer/> какие трансформные разломы имеют собственные названия)

Результат представляется в виде копии экрана (Ctrl+Alt+C).

Примечание: Наиболее частая ошибка при выполнении задания – построение эйлеровых меридианов на основе границы плит, отображаемой на глобусе зелёными (трансформные) и красными (дивергентные) линиями. Эти линии должны служить только ориентирами при определении участка выполняемого построения. В окрестностях этих линий следует отыскивать в рельефе дна и геофизических полях положение линейных впадин трансформных разломов и центральных рифтов, и только после этого осуществлять все свои построения на основе геометризации выявленных вами линейных структур (линеаментов), а не по нанесенным на глобус результатам чужой интерпретации.

Задание 3 Поиск полюса вращения двух плит (2 часа самостоятельно)

Для заданного вам варианта пары плит оценить графическими методами положение полюса их относительного вращения и сравните его с центрами эллипсов доверительной вероятности окрестностей, приведенными в таблице:

Таблица взята из наиболее часто цитируемой статьи о современных движениях плит (DeMets et al., 2010 [4]). Её результаты получены из анализа данных GPS, аномалий магнитного поля и многолучевой батиметрии морского дна с взаимным согласованием движения плит.

Таблица 2

Наиболее подходящие координаты некоторых современных полюсов вращения плит

Пара плит	Вариант	Широта (C+)	Долгота (B+)
AU-AN Австралийская - Антарктическая	а	11°18'	41°48'
NB-AN Африканская - Антарктическая	б	−6°12'	−34°18'
NZ-AN Наска - Антарктическая	в	33°06'	−96°18'
PA-AN Тихоокеанская - Антарктическая	г	−65°06'	99°48'
SM-AN Сомалийская - Антарктическая	д	11°12'	−56°42'
EU-NA Евроазиатская – Северо-Американская	е	61°48'	139°36'
NB-NA Африканская – Северо-Американская	ж	79°12'	40°12'
CO-NZ Кокос - Наска	з	1°36'	−143°30'
CO-PA Кокос - Тихоокеанская	и	37°24'	−109°24'
NZ-PA Наска - Тихоокеанская	к	52°42'	−88°36'
NB-SA Африканская – Южно-Американская	л	60°54'	−39°00'
IN-SM Индийская - Сомалийская	м	22°42'	30°36'

С классическими результатами этой работы обычно сравнивают собственные результаты большинство исследователей. Вы так же можете проверить свои только что выполненные построения (рисунок 28).

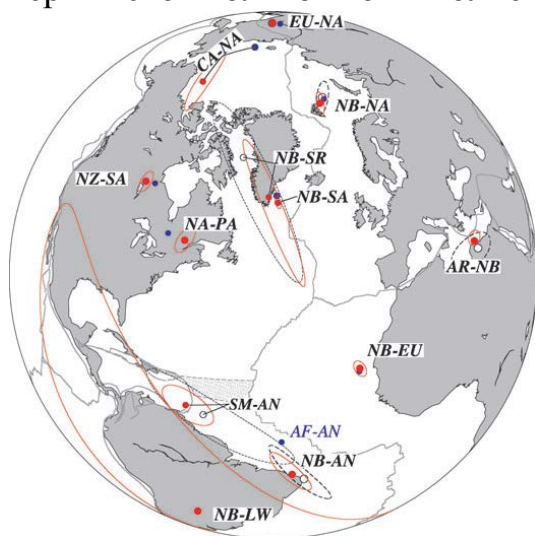


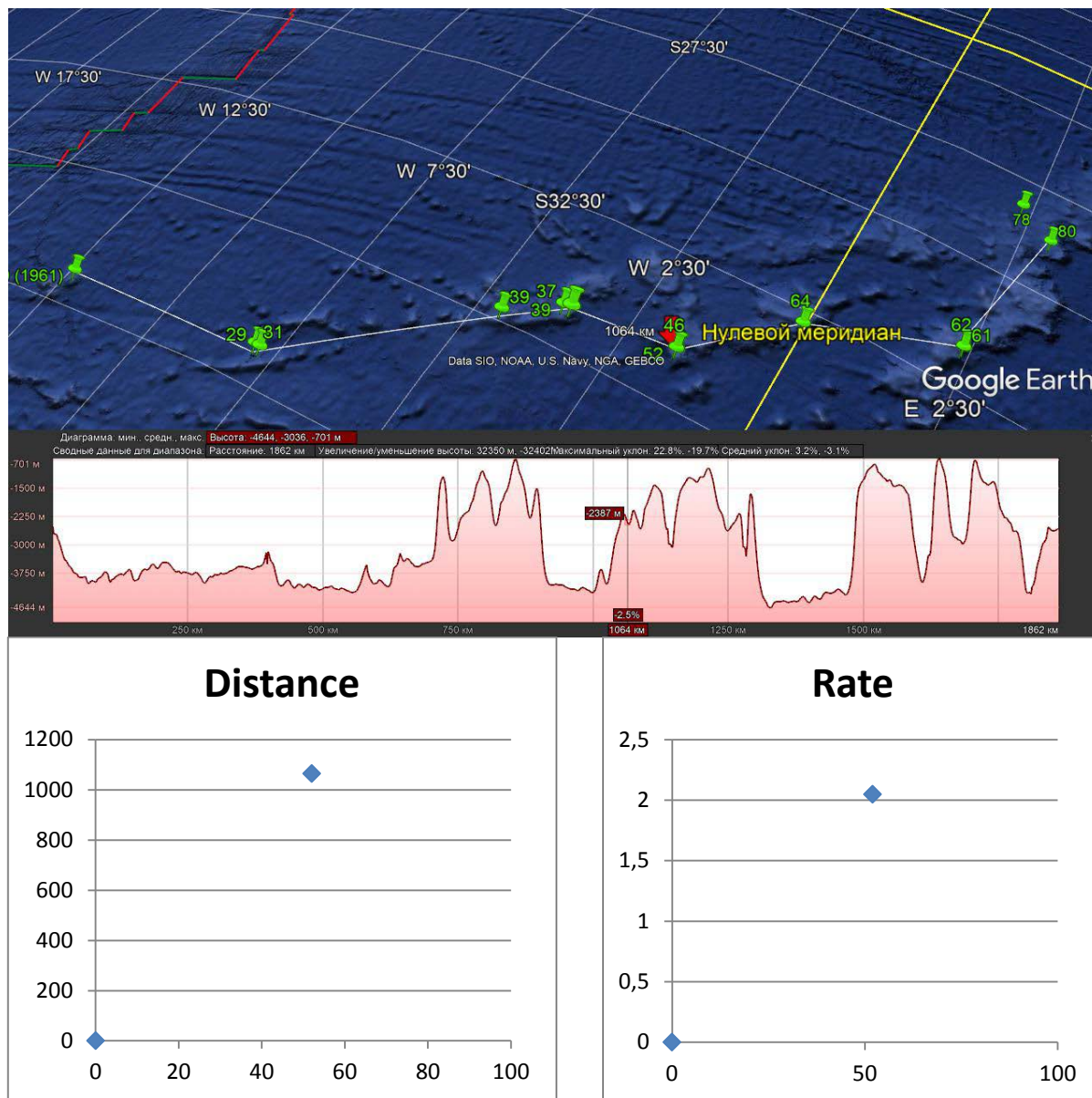
Рисунок 28 - Некоторые полюса модели MORVEL (красный) и двумерные эллипсы с 95-процентным доверительным интервалом (красный), Атлантический и Арктический регионы. Видимое движение против часовой стрелки для первой указанной плиты относительно второй. Доверительные эллипсы полюсов NB-SA и EU-NA слишком малы, чтобы их можно было увидеть в масштабе этой карты. Наилучшее расположение для пары плит по модели MORVEL показаны пустыми кружками и пунктирными эллипсами. Синие кружки показывают расположение выбранных полюсов по модели NUVEL-1A (по [4]. figure 12).

Тема «Горячие точки» (Hot spots)

В этом задании вы попытаетесь оценить направление и скорости перемещения плит в рамках гипотезы о неподвижности горячих точек. Объектом детального анализа будет одна из восьми вулканических цепей (траекторий горячей точки), описанных в слое «Volcanic chains ("hot spot" tracks)». Раскрывая списки, найдите заданную вам для упражнения вулканическую цепь, двойной щелчок поможет быстро «оказаться» над нею. Основания острия булавок указывает на точное расположение вулкана, рядом подписан абсолютный возраст вулканических пород или туфов. Для многих вулканов приводится дополнительная информация (навести курсор «стрелка» на его метку и щелкнуть мышкой).

Последовательность работы:

- Определить самый молодой вулкан цепочки и, приняв его за отправную точку, построить однонаправленный путь вдоль всей цепочки. Сохранить построенный путь в папке лабораторной работы и построить профиль рельефа вдоль него. Сохранить изображение на листе рабочей книги Excel. Пример изображение для цепи Тристан де Кунья приведен на рисунке 29.



Age	Distance	Rate						
0	0	0						
52	1064	2,046154						

80

Рисунок 29 - «Путь» вулканической цепочки Тристан де Кунья и пример снятия характеристик промежуточной точки (sea mount)

- Заполнить в Excel рабочую таблицу «Расстояние-Возраст». Перемещая курсор внутри окна профиля рельефа, оценить и записать в таблицу расстояния вулканов от начальной точки и соответствующие возраста островных базальтов, вынесенные на глобус рядом с меткой вулканов.
- Построить на листе Excel графики «Расстояние-Возраст» и «Расстояние-Скорость», оценить коэффициент корреляции и среднюю скорость перемещения плиты относительно горячей точки. Приведите оценки скорости километрах за 1 млн лет и в сантиметрах за один год.
- По форме облака точек на графиках оценить была ли скорость перемещения плиты относительно горячей точки постоянна во времени. Обоснуйте свой вывод.
- Включить для исследуемой области карту возрастов океанической коры «Seafloor age». Сохранить изображение на листе рабочей книги Excel. Нет ли на карте подсказки, поясняющей особенности формы облака точек? Возможно что-то прояснит анализ рельефа морского дна? Полезно посмотреть направление трансформных разломов, хребтов и валов.

Задание 4 Динамика перемещения горячей точки (2 часа самостоятельно)

Шаг 1

Для вулканической цепочки выполнить построение описанных выше графиков с фиксацией всех результатов в Excel.

В текущей версии «Dynamic Earth» представлены данные по семи подводным вулканическим цепям, они пронумерованы в таблице. Вариант студента совпадает с его номером в списке группы (таблица 3).

Таблица 3

Исходные данные по номерам вариантов

Цепь вулканов	Вариант
Easter Island volcanic chain	1, 8, 15, 22, 29
Hawaiian-Emperor chain	2, 9, 16, 23, 30
Louisville volcanic chain	3, 10, 17, 24, 31
Tristan da Cunha	4, 11, 18, 25, 32
New England seamounts	5, 12, 19, 26, 33
Kerguelen	6, 13, 20, 27, 34
Reunion	7, 14, 21, 28, 35

Шаг 2

Для всех вулканических цепочек, описанных в Dynamic Earth, глядя на расположение вулканов в цепочках и их возраст определите направление движения для Африканской, Австралийской, Тихоокеанской, Северо-

Американской и Наска плит. Припишите каждой из плит основное направление её движения, вытекающее из анализа возраста вулканических цепей. На копию карты рис. 18 нанесите стрелки направления перемещения плит относительно горячих точек из набора значков (рис. 31)[8].

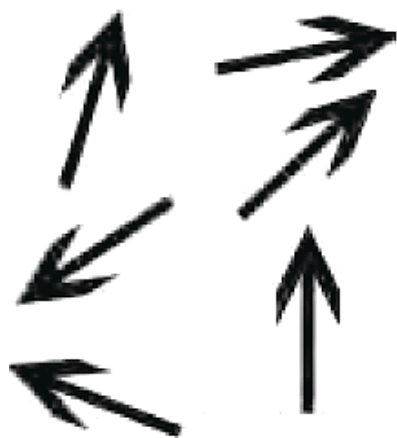


Рисунок 31 -
Генерализованные указатели
направления

На основе выполненных определений направлений движения плит предскажите возможный характер границы (конвергентный или дивергентный) между следующими парами плит:

Тихоокеанской и Наска;
Южно-Американской и Африканской;
Северо-Американской и Евразийской;
Африканской и Антарктической.

Как согласуются направление границ между плитами с определенными вами векторами их движения?

Краткие комментарии о выполнении задания разместить в удобных местах рабочего листа Excel.

Зоны субдукции

И так, мы уже познакомились с зонами спрединга – наращивания тектонических плит, описанием их движения на Земном шаре и индикаторами этих движений – вулканическими цепочками. Но для того, чтобы плиты могли двигаться, они должны «уметь» не только наращиваться, но и куда-то исчезать. Теория утверждает, что плиты поглощаются в зонах субдукции – опускания океанической плиты под другую плиту: континентальную или тоже океаническую. Посмотрим, какие зримые доказательства этой теории можно отыскать в пакете **Dynamic Earth**.

В пакете в разделе **Seismicity** есть группа **20 years of large earthquakes**. В ней эпицентры всех землетрясений, зафиксированных за период с 1993 до 2012 года, с магнитудой большей или равной 6 описаны датой, магнитудой, координатами и глубиной их расположения. На изображении дневной поверхности землетрясения показаны красными косыми крестами на белом фоне. Вся информация о единичном событии считывается при инспектировании его значка правой клавишей мышки. Аналогичный, но более полный набор данных содержит слой **30 years of eq's M = 5.0 +**. Дополнительный плюс – значки землетрясений раскрашены по глубине расположения эпицентра, а размер значка отражает магнитуду события.

Такой объём информации представляет возможность воспроизвести и проверить классические сейсмологические характеристики зон субдукции – графики Бенъофа (рисунок 32).

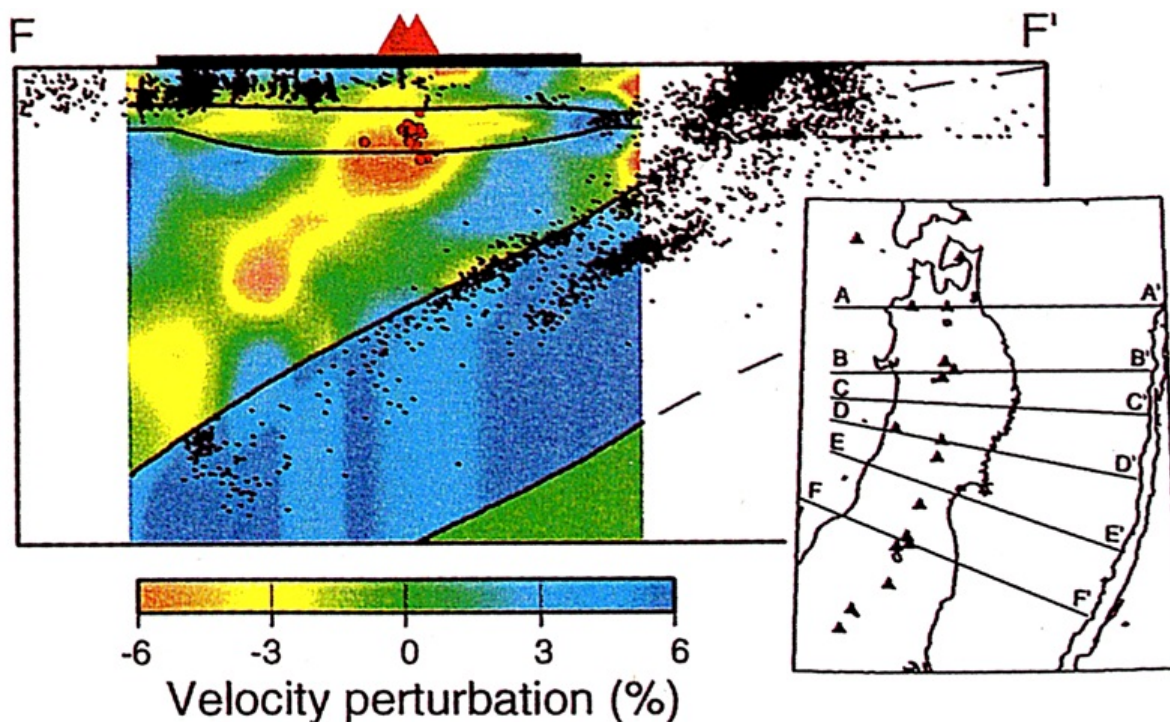


Рисунок 32 –
 Размещение сейсмических очагов (показаны точками) и их фокальные механизмы
 в субдуцирующей литосферной плите и над ней на примере Японской зоны субдукции.
 По Т. Йосии (1979)

На профиле четко различаются четыре группы очагов землетрясений: зона столкновения и деформации плит, граничные слои вдоль верхней и нижней поверхностей погружающейся плиты, внутренние напряжения верхней плиты и очаги магмообразования (показаны красными кружками). Распределение эпицентров в пространстве позволяет визуально отделить глубоководные землетрясения на контактах погружающейся пластины от относительно мелкофокусных землетрясений иных групп. Для учебных целей представляется несомненным достоинством ограничение описанных землетрясений магнитудой в пять баллов и выше. Точность определения их координат выше (лучшее соотношение «сигнал-помеха»), а их малое количество допускает «ручную» обработку.

Анализ зон субдукции рассмотрим на примере восточной окраины Австралийской плиты. Здесь выделяются микроплиты Тонга и Кермадек, граничащие с Тихоокеанской плитой через глубоководный желоб Кермадек (рисунок 33).

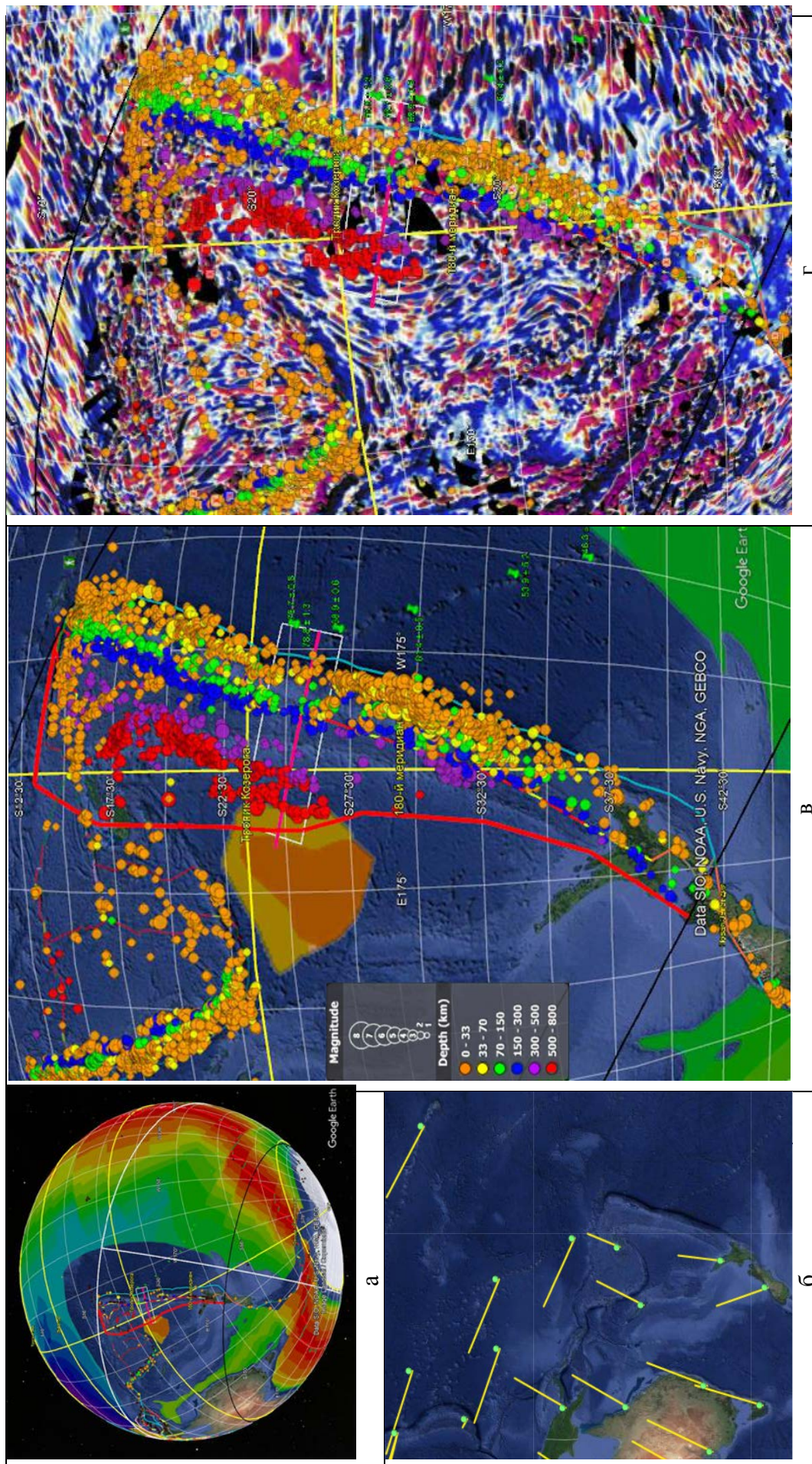


Рисунок 33 а – Эйлеровы меридиан и широты от полюса взаимного вращения Тихоокеанской и Австралийской плит; б – векторы современных смещений по данным GPS на Google Map (sideshow.jpl.nasa.gov/post/series.html); в – карта-схема слэба – погружающейся в зоне субдукции пластины океанической коры Тихоокеанской плиты (красная линия – нижняя граница пластины, розовая линия и белый полигон – область и профиль оценки зоны Биньофа); г – карта аномалий магнитного поля

Последовательность работы:

- Проверяем направление движения поглощаемой плиты по данным GPS (рисунок 33б), из анализа вулканических цепочек и восстановлением эйлеровых меридиана и широт по таблице полюсов вращения (таблица 2).

- Выберем в крест простираения желоба профиль («Путь») и его окрестность («Многоугольник»). Сохранить построенные путь и окрестность в папке лабораторной работы. Сохранить изображение путь и профиль рельефа вдоль него на листе рабочей книги Excel (рисунок 34).

- Заполнить рабочую таблицу «Расстояние-глубина», оценивая расстояния «Линейкой» от оси желоба (границы плит) до значка очередного землетрясения, записывая расстояние и глубину эпицентра, считанную во всплывающем окне информации.

- Построить на листе Excel график «Расстояние-глубина», оценить наиболее вероятное положение кровли слэба по облаку точек.

- Провести анализ облака точек рисунка 34, выделить зону столкновения (красный овал), напряжений верхней плиты (синий овал), верхнюю (желтый овал, 100-300 км) и нижнюю (зелёный овал, 500-700 км) зоны наибольшей интенсивности землетрясений на поверхности слэба.

Примечание: построение может быть выполнено с использованием слоев **20 years of large earthquakes** или **30 years of eq's M = 5.0 +**.

- На карте Google Earth, используя слой **30 years of eq's M = 5.0 +**, проводим наиболее вероятную нижнюю границу слэба (рисунок 33в). Из анализа ширины цветных зон разных интервалов глубин эпицентров делаем выводы: в южной части пластина круто уходит вниз, а в северной части погружение более пологое. Находим вероятную причину:

- **Краткий анализ.** На северном окончании желоб Кермадек плавно меняет направление и выполаживается. Соответственно, связанная с ним субдукционная граница переходит в трансформный разлом, здесь Тихоокеанская плита раскалывается на две части. Северная часть не погружается, а сохраняет свою целостность и скользит сверху по поверхности мантии, что подтверждается данными GPS (рисунок 33б) и рисунком поля магнитных аномалий (рисунок 33г), под ней верхняя мантия продолжает двигаться параллельно геоиду. Южная часть пластины погружается и вдоль нее опускается астеносферный слой верхней мантии. Пологое опускание северного обреза литосферной плиты (слэба) может быть объяснено вязким волочением её потоком верхней мантии под северной частью пластины, движущейся в западном направлении.

№	L	H
1	-65	-10
2	-208	-10
3	-506	-499
4	-474	-496
5	-569	-530
6	-649	-675
7	-599	-565
8	-524	-509
9	-232	-171
10	-299	-269
11	-194	-18
12	-216	-147
13	-235	-10
14	-670	-604
15	-517	-523

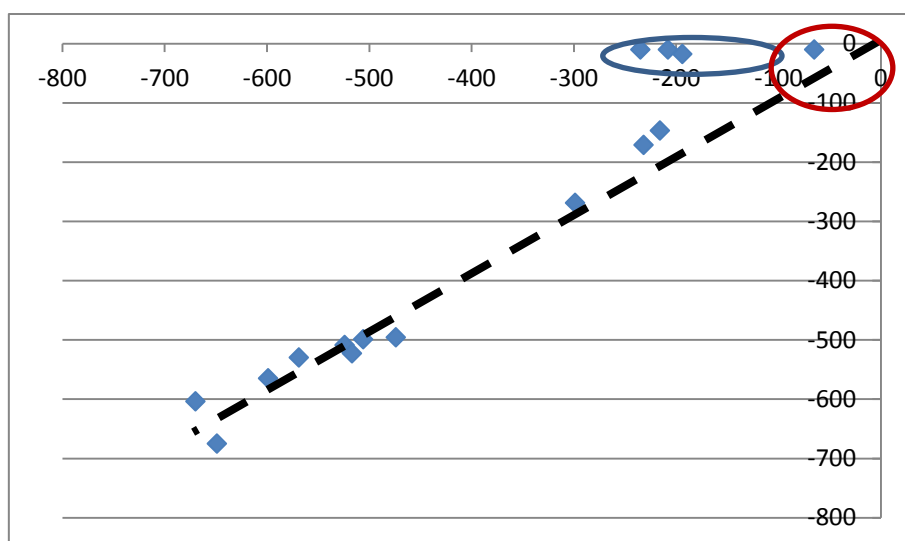
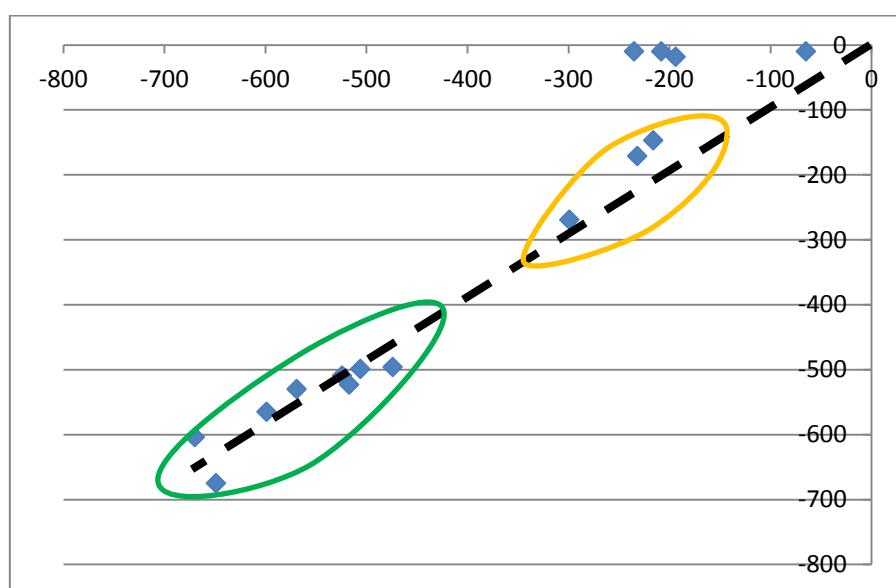


Рисунок 34 –
Рабочий лист исследования зоны Бенъофа (начало)

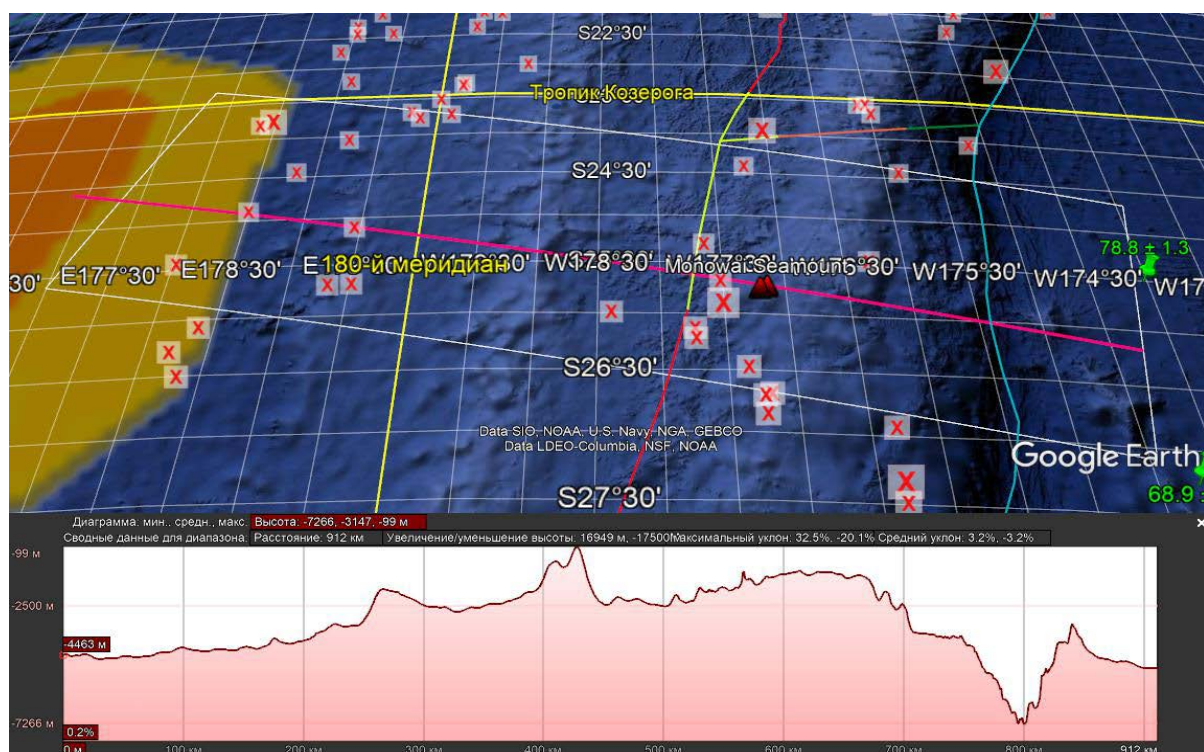


Рисунок 34 –
Рабочий лист исследования зоны Беньофа (окончание)

Вязкое взаимодействие быстро перемещающегося северного мантийного потока и несомой им Тихоокеанской плиты с нисходящим потоком мантийного вещества под зоной субдукции приводит к локальному их разогреву в зоне разделения и перестроения потоков. Это выражается в цепочке вулканических островов (Самоа) севернее окончания желоба Тонго. На поверхности дна и в океанической коре палеовулканизм выражается в виде широкой полосы интенсивного торошения (разнонаправленного растрескивания) граничных участков (рисунок 35). Погружающаяся плита не имеет ярко выраженных зон трещиноватости, поэтому она погружается без разделения на лепестки. Характер вулканизма и сейсмичности изменяется на 35°ЮШ, где океаническая кора висячего (верхнего) блока Тонго и Кермадек сменяется континентальным склоном и шельфом Северного острова Новой Зеландии.

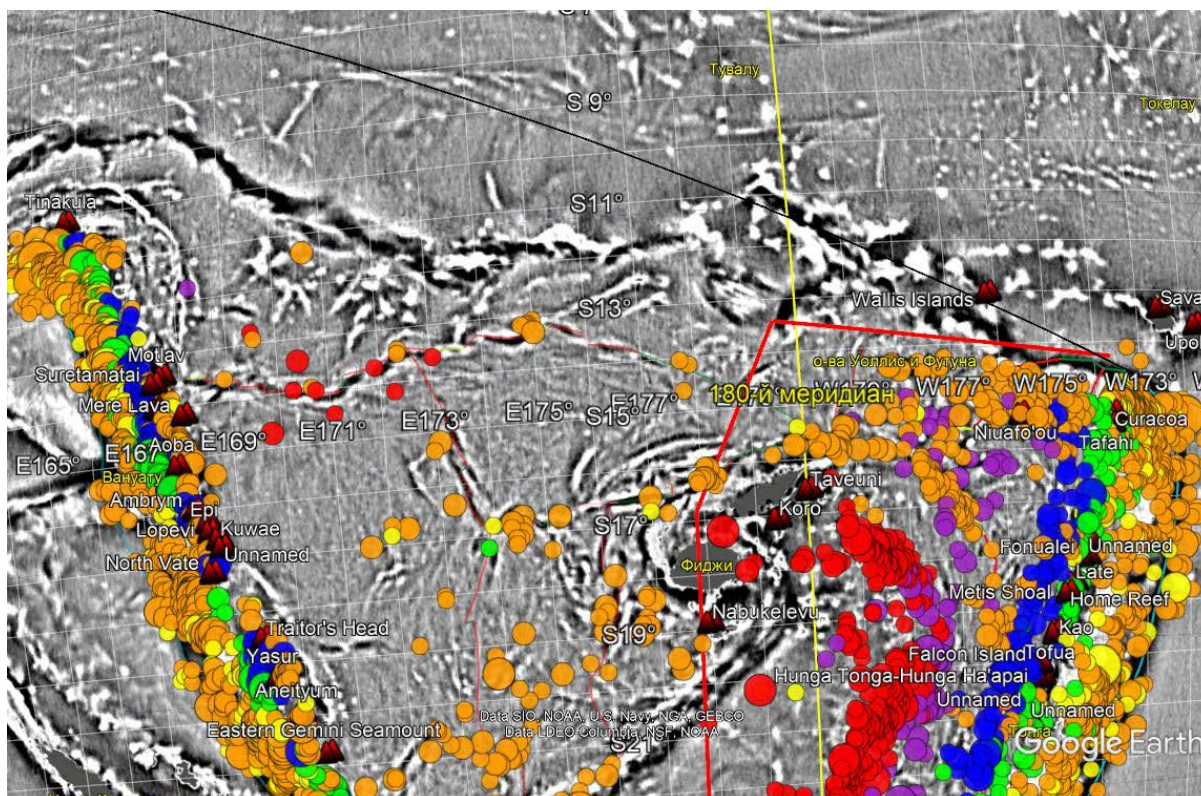


Рисунок 35 –

Отражение в поле гравитационных аномалий зоны торошения океанической плиты на границе северного и южного потоков конвекции верхней мантии

Задание 5 Геометрия зон субдукции (2 часа самостоятельно)

Шаг 1

По описанной выше технологии построить графики зоны Бенъофа для зоны субдукции Южно-Американского континента в полосе от 5° ЮШ до 45° ЮШ (рис. 36а). Для равномерной изученности каждый студент учебной группы строит один график вдоль широтного профиля протяженностью в 1000 км, начинающегося от оси Чилийского желоба (границы плит) с географической параллелью N° ЮШ, где N определяется преподавателем по списку группы, а шаг между профилями равняется 40° , поделенным на численность группы. Для удобства полоса изучения может быть нанесена в виде узкого полигона вдоль профиля. Программы Google Earth Pro и Excel открываются параллельно. Рабочая таблица заполняется считываемыми в Google Earth Pro данными (рисунок 36б). Желательный минимум - пять точек из каждой цветовой группы (интервала глубин). Глубина и долгота заносятся как отрицательные значения для «правильного» отображения графика, либо, вместо координаты, точка описывается положительным расстоянием от оси желоба.

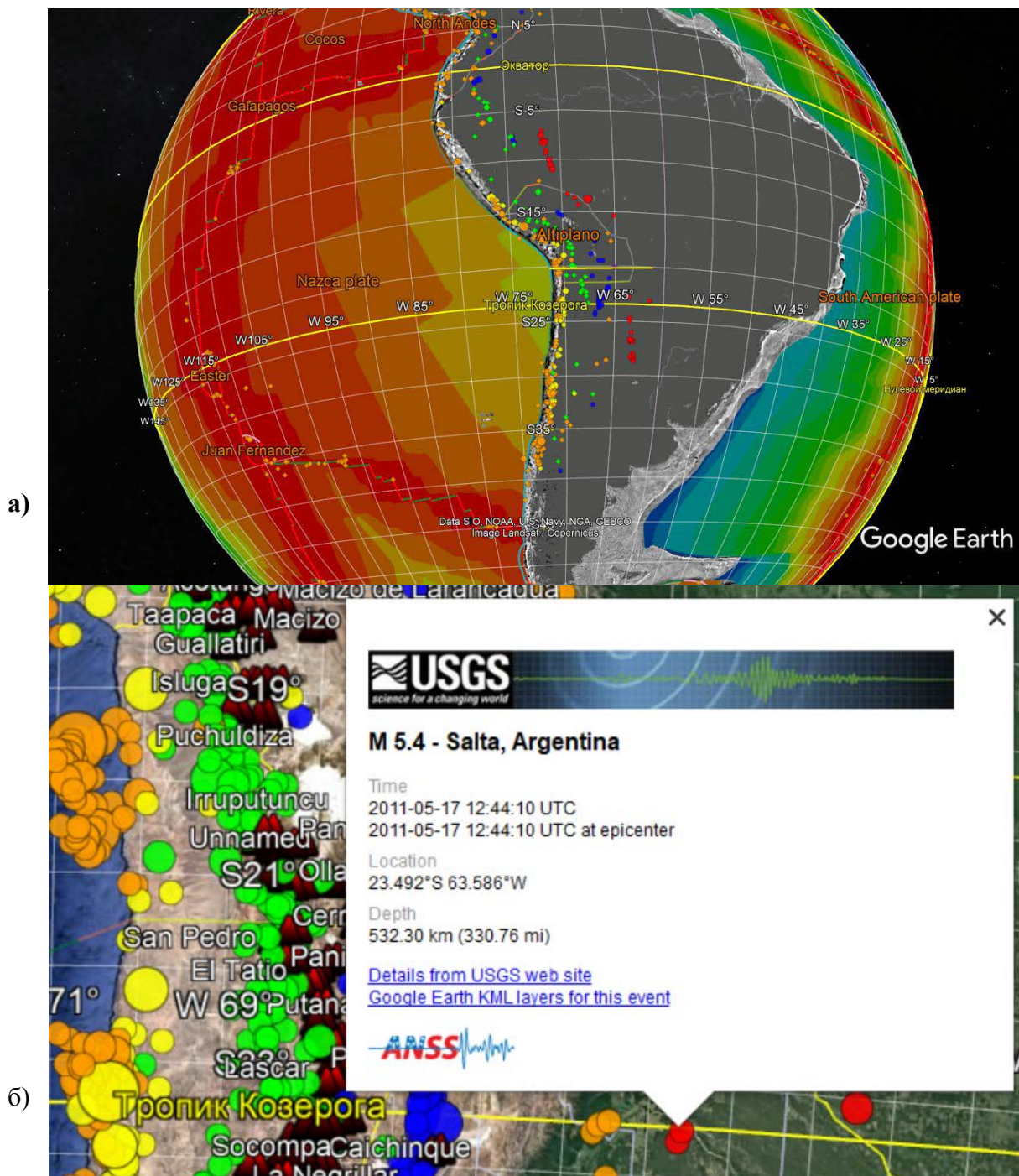


Рисунок 36.

*а – область изучения, б - пример считывания информации о землетрясении:
долгота - -63.585, глубина - -532.30*

Шаг 2

После заполнения всей таблицы отобразить данные на графике. Точки графика классифицируются по источникам возникновения землетрясений, группируются цветными овалами, группы подписываются; определяется угол падения слэба и глубина его наблюдения по сейсмологическим данным.

Примечание. Следует иметь в виду, что внутри континентальной плиты напряжения из зоны субдукции могут передаваться на значительные расстояния, вплоть до краевого прогиба, и порождать там надвижки и мелкофокусные землетрясения (рисунок 37). Любая из красных линий чертежа отображает положение зон напряжений, разрывов и трещиноватости, к которым могут быть приурочены очаги землетрясений.

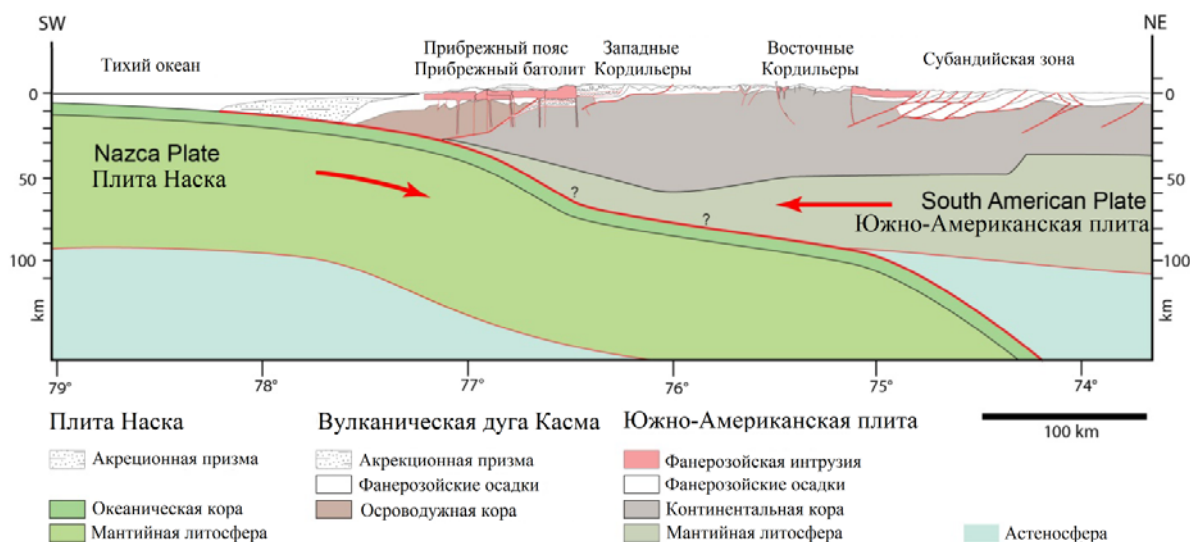


Рисунок 37 –
Обобщенный геологический разрез, демонстрирующий геометрию границ
в зоне Чилийской субдукции и складчатой системы Анд (по [9])

Задание 6 Схема сегментации плиты Наска (2 часа самостоятельно и 2 часа аудиторно)

Наиболее крупные трансформные разломы, с учетом их продолжения в виде зон трещиноватости, пересекают океанические плиты, деля их на полосы – сегменты. Отдельный сегмент обладает внутренней жесткостью и относительно подвижностью по отношению к соседним сегментам. При погружении океанической плиты в зоне субдукции она может раскалываться отдельные полосы-сегменты, которые образуют отдельные слэбы, различающиеся скоростями, углами и направлениями их погружения (рисунок 38). Блок-схема демонстрирует крайний случай образования окон отсутствия слэба из-за разрыва сегмента по шву зоны спрединга. Мы ограничимся изучением более простого погружения непрерывных полос-сегментов океанической плиты Наска (частично показано справа на рисунке 38).

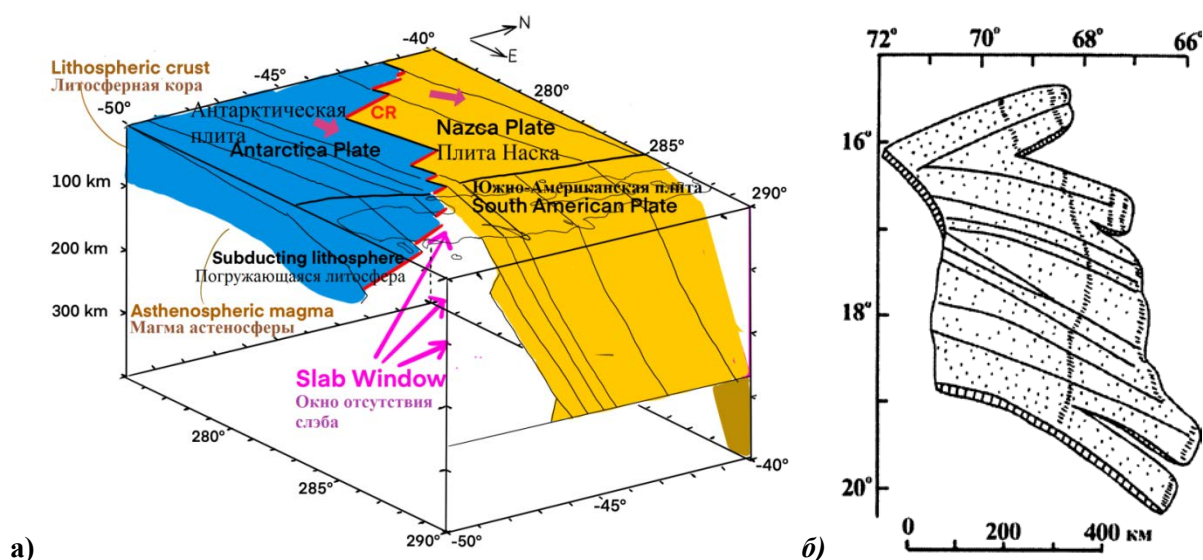


Рисунок 38 -

Блок-схема зоны субдукции плиты Наска под Южно-Американскую плиту.

(a, By Candyueung168 - Own work, CC BY-SA 4.0,

<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=110752762>),

б - сегментация плиты Наска при её погружении под «угол Арики»

Андской активной окраины ([2], рис. 6.28)

Вам предлагается проверить правильность рисунка 38б изготовление бумажной модели. На рисунке 39 представлена карта слэба плиты Наска в прямоугольной проекции по градусам. Его масштаб 1 градус в 1 см.

- Распечатайте рисунок на плотную бумагу.
- Обрежьте полосу параллельную желобу по пунктирной линии, превратите полосу в лепестки, сделав прорезы по пунктирным линиям продолжений зон трещиноватости от края полосы до оси желоба.
- Согните каждый лепесток вниз по линии желоба. Этот сгиб отражает взаимодействие тонкой океанической и жесткой континентальных плит в зоне субдукции. Сгибать можно под углом 20-30 градусов.
- Посмотрите внимательно на взаимное расположение кромок лепестков: отметьте на бумаге границы перекрывающих друг друга и расходящихся лепестков.

Посмотрите внимательно на взаимное расположение кромок лепестков: отметьте на бумаге границы перекрывающих друг друга и расходящихся лепестков. Там, где линия оси желоба вогнута в направлении субдукции (на рисунке 39 оно показано стрелкой), лепестки «слэба» набегают друг на друга, на выпуклых участках между лепестками появляются зазоры. Но прежде, чем переносить геометрию слэба с бумажной модели на карту, посмотри внимательно на геологический профиль (рисунок 37). Толщина океанической плиты (кора плюс мантийная часть литосферы) составляет порядка 40-70 км. Бумажные ли-

сты легко изгибаются и свободно перемещаются в воздухе, в то время, как литосфера зажата сверху гравитационными, а снизу и с боков – упругими силами. Для того, чтобы получить способность располагаться друг над другом, плиты за счет различных углов погружения должны разойтись по вертикали на их толщину – 40-70 км. А на малых глубинах избытки ширины сегментов слэба, подвергающихся неравномерной деформации на контакте плит, могут быть компенсированы только волнообразными изгибами зажатой с боков пластины слэба.

Проведём очередной «бумажный эксперимент.

- Сделаем новую копию рисунка на плотной бумаге.
- Обрежьте полосу параллельную желобу по пунктирной линии.
- Нарежем полосу на лепестки, только пунктирными линиями, по которым в первой модели наблюдалось расхождение лепестков «слэба».
- Аккуратно наметить линию сгиба каждого лепестка по линии желоба, с минимальными отступлениями от его оси, например, при помощи кромки подходящей по диаметру монеты.
- Расходящиеся лепестки отогнуть аналогично с первой бумажной моделью.
- Для того, чтобы согнуть длинные участки полосы, объединяющие несколько сжатых (неразрезанных) лепестков, плотно прижмем модель рисунком к плоской поверхности стола. Попытаемся отогнуть широкую часть полосы в одной или нескольких точках. При плоском прижатом рисунке бумажная полоска изгибается, компенсируя своими изгибами напряжения, возникающие из-за криволинейности стыка. При этом уплощенные зоны слэба PU и PP возникают естественным путем при попытке имитировать изгибами бумажной полосы поверхности карты рисунка 39.

Итоговая бумажная модель зоны субдукции изготавливается коллективными усилиями группы. Для увеличения её наглядности снабдим модель ребрами жесткости: приклеим к ней снизу профили зон Биньофа, оцененные по эпицентрам землетрясений, их горизонтальный масштаб как и у карты $1^\circ = 1\text{ см} \approx 100\text{ км}$, а вертикальный $1\text{ см} = 100\text{ км}$. Каждый студент представляет свой профиль в виде полосы бумаги с клапанами для приклеивания к нижней поверхности карты (рисунок 40). Количество приклеиваемых профилей регулируется техническими возможностями склеивания.

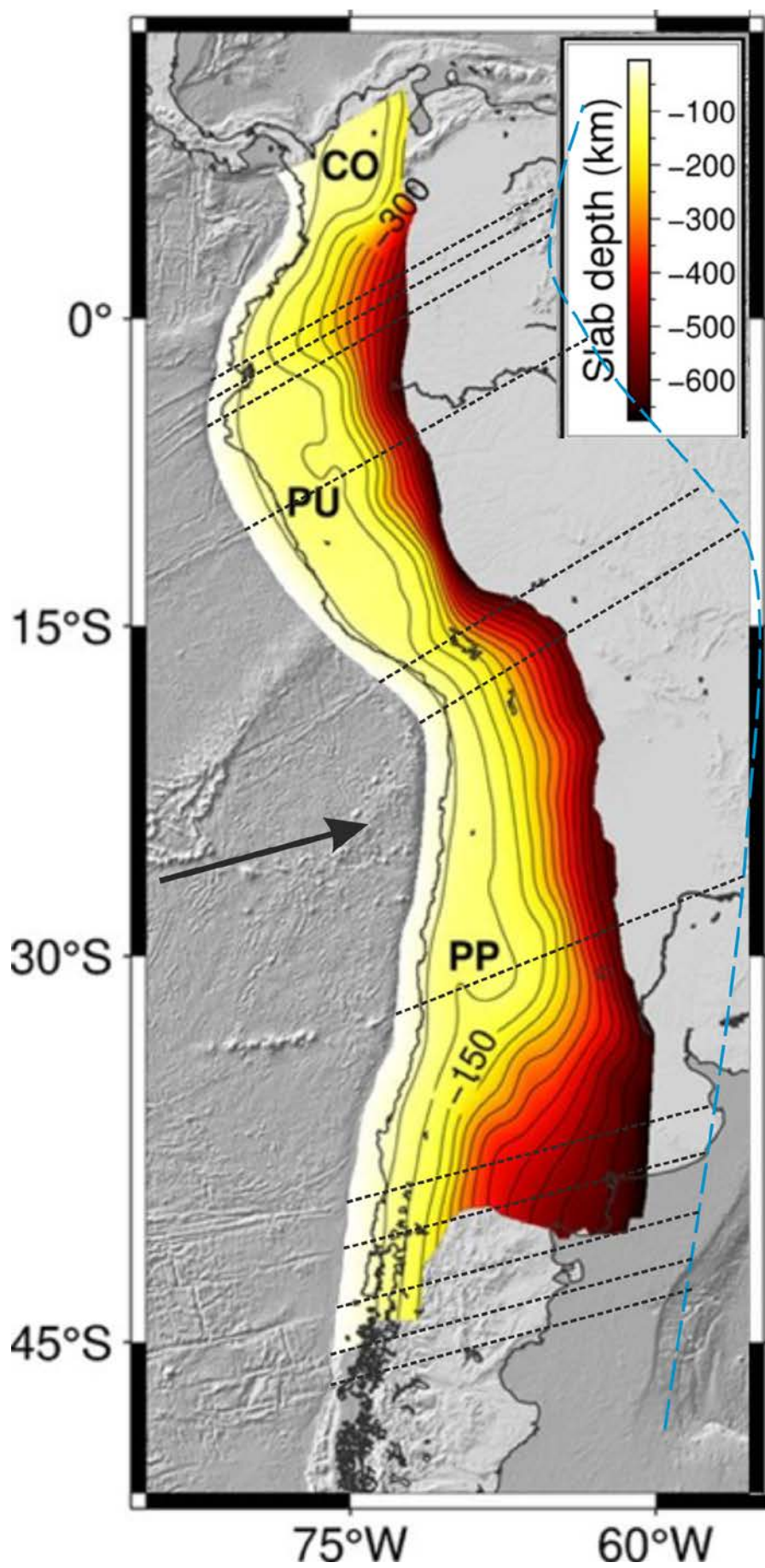


Рисунок 39 - Представление плиты Наска на основе модели Slab2 [3]. Изолинии проведены через каждые 50 м. Погружающийся слэб Наска относительно горизонтален на участках (CO – Колумбия) (PU – Перу) и (PP-Пампея), что наглядно демонстрирует поведение изогипсы -150 км. Дополнительно показана 600 км полоса вдоль оси Перу-Чилийского желоба и продолжения в ней направлений зон трещиноватости океанической плиты Наска (пунктирные линии)

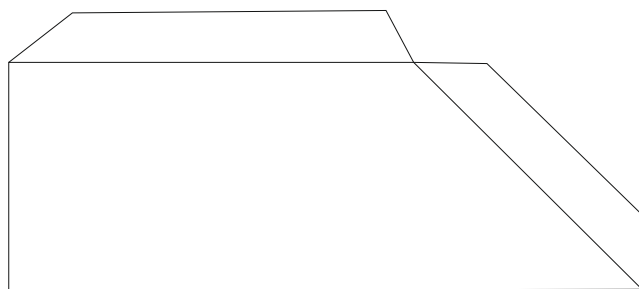


Рисунок 40 - Пример широтного профиля к карте слэба

На рисунке 41 приводится пример геометризации сегментов океанической плиты Каско в программе **Google Earth Pro** на основании информации слоев **Dynamic Earth**. Оконтурены три непрерывных сегмента блок-диаграммы. Границы сегментов на океаническом дне проведены по лениаментам аномалий гравитационного поля, положение нижних кромок слэбов оценена по расположению очагов наиболее глубоких землетрясений. Ваша задача: попытаться геометризовать максимальное количество полос сегментов плиты Наска на протяжении Перу-Чилийского глубоководного желоба.

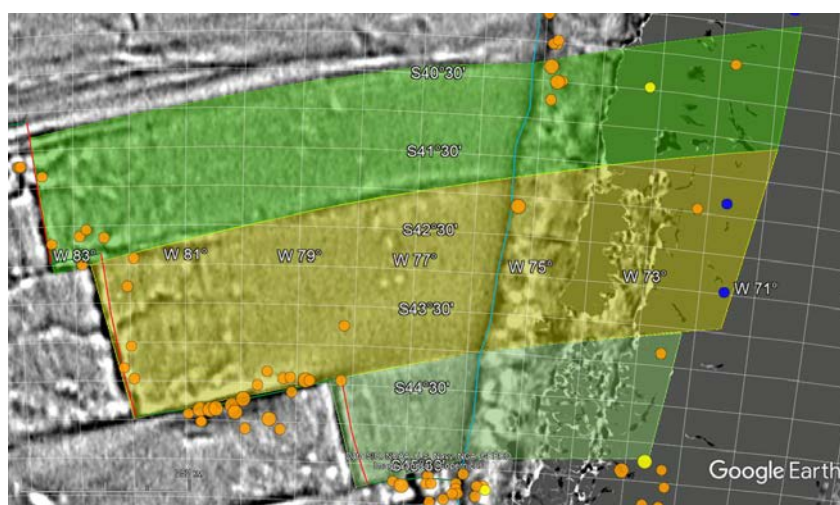


Рисунок 41 - Схема сегментации южной части плиты Наска по гравитационным и сейсмологическим данным

Шаг 1

По картам возраста коры, магнитных и гравитационных аномалий представить плиту Наска в виде полос, разделенных трансформными разломами и зонами трещиноватости. Проследить продолжения этих полос под Южно-Американский континент, ориентируясь на слой эпицентров землетрясений. Очертить разноцветными многоугольниками выделенные полосы океанической коры и их продолжения под континентом в виде

слэбов (иконка «Добавить многоугольник» на панели инструментов). Полупрозрачность слоя устанавливается при инспекции (редактировании свойств) сохраненного многоугольника.

Шаг 2

Оценить углы вхождения каждой из построенных Вами полос в мантию. Сравнить эту оценку угла вхождения с оценками, полученными студентами группы по широтным профилям. Найти объяснение наблюдаемым углам, все ли они укладываются в какую-то закономерность?

Шаг 3

Ознакомиться со всеми доступными слоями информации в границах плиты Каско и западной части Южно-Американского континента, проанализировать её, подготовить своё видение конвекции мантии и её взаимодействия с океанической корой.

Шаг 6

На совместном семинаре учебной группы доложить результаты своих построений. Подготовить отчеты индивидуальных и коллективных построений. Подготовить свои гипотезы причин наблюдаемого поведения слэба плиты Наско.

Подсказка

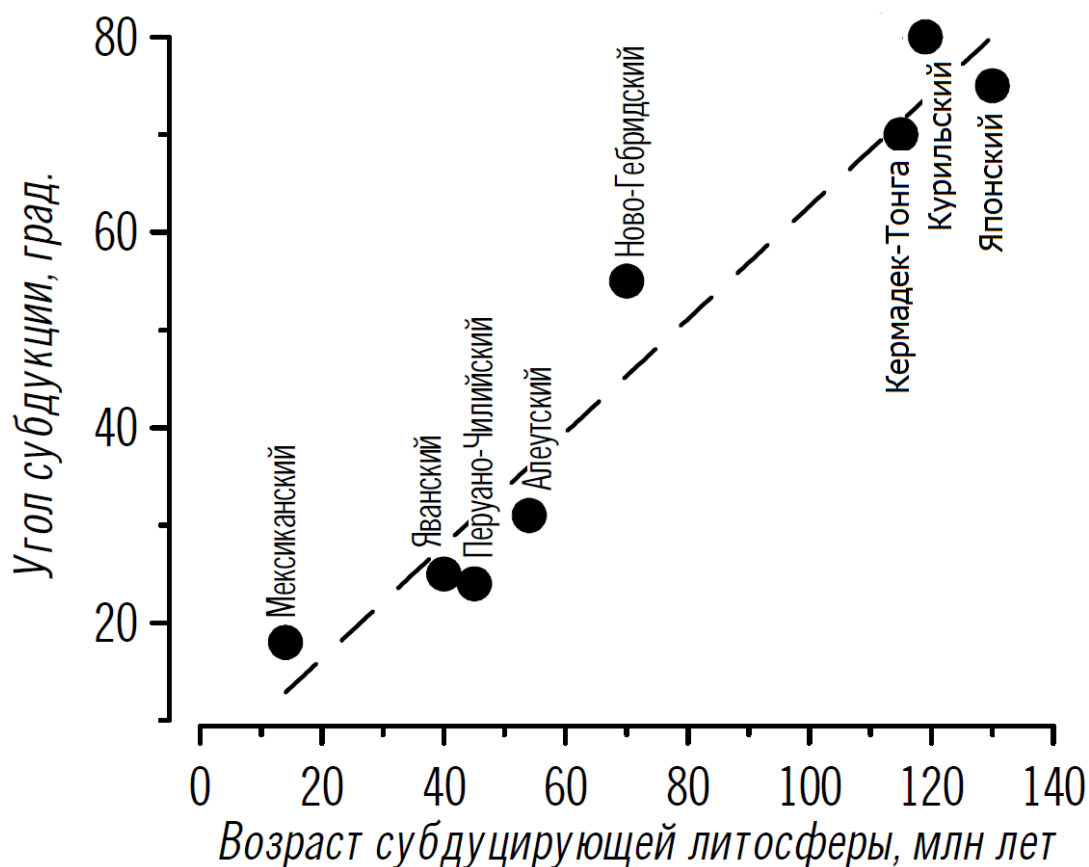


Рисунок 42 -
Зависимость угла субдукции от возраста субдуцирующей океанской литосферы
(по [1], рис.4.14)

Вопрос на эрудицию

А теперь включим слой аномалий магнитного поля Земли (EMAG2: Earth Magnetic Anomaly Grid). Внимательно осмотрим поведение аномалий в окрестности вдольберегового желоба. К востоку от желоба структура океанической коры в магнитном поле повсеместно просматривается в полосе шириной около 50 км. То есть, океаническая кора «видна» сквозь 10 км пород континентальной коры. Почему глубже её не «видно», ведь слэб тянется ещё на несколько сот километров (рисунок 41)?

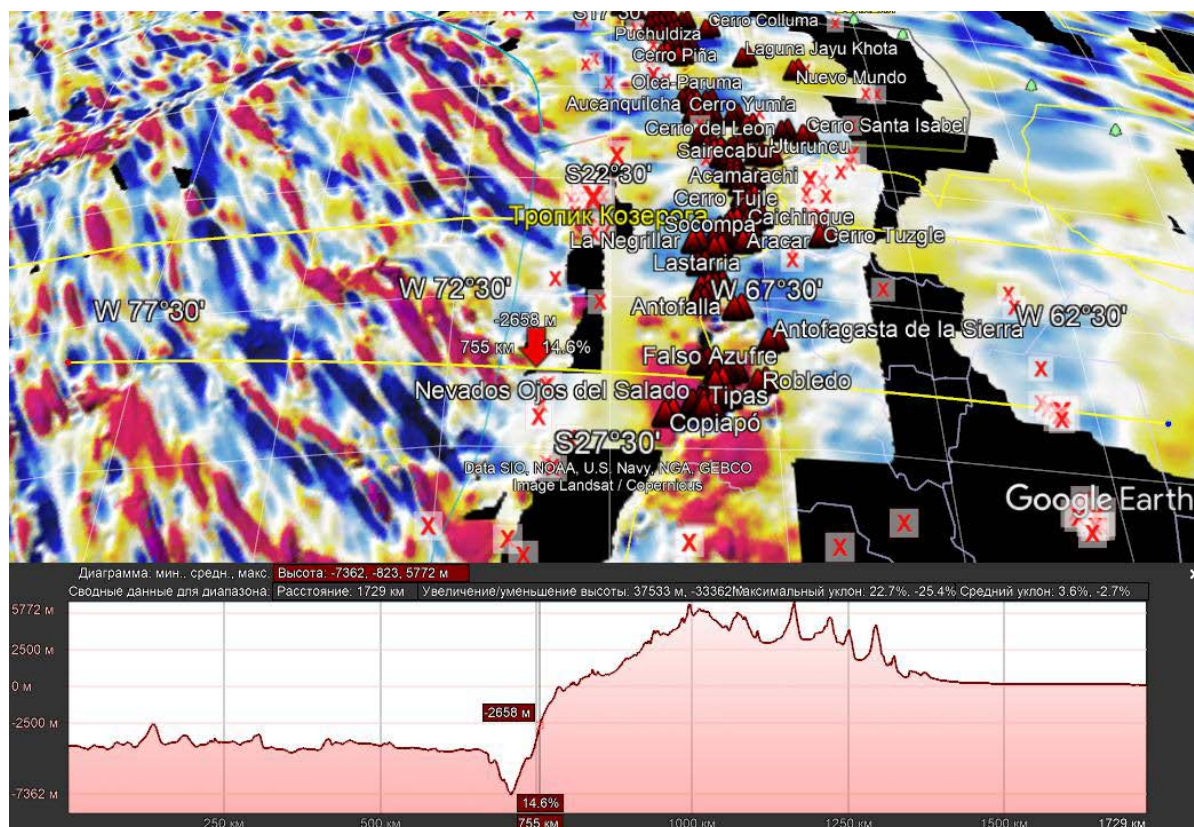


Рисунок 43 -

Граница прослеживания аномалий магнитного поля через толщу континентальной коры
(голубая линия – ось Чилийского Желоба)

Заключение

Лабораторный курс ориентирован на студентов общегеологических специальностей, а не на подготовку специалистов – тектонистов. Данное учебное пособие направлено на выработку у обучающихся студентов стабильных зрительных образов некоторых основных понятий геотектоники и геодинамики. Графическая среда Google Earth Pro очень подходит для этих целей: она дружелюбна к рядовому пользователю, и в сочетании со специализированными слоями географической, геофизической, геотектонической и сейсмологической информации позволяет студенту, буквально, «пощупать и повертеть» Землю в своих руках.

Вчерне лабораторный практикум был написан осенью прошлого года и в течение весеннего семестра опробовался на практических занятиях двух групп гидрогеологов второго курса. Техническая часть задания оказалась посильна для всех студентов, затруднения, как правило, возникали при формулировании текстовых пояснений уже выполненной работы. Поэтому пояснительная часть лабораторной работы является не менее важной, так как, развивает у студентов навыки использования письменной профессиональной речи.

Данное учебное пособие не покрывает всего объема материала курса «Геотектоника». Недостающие разделы рекомендуем брать из других учебных пособий.

Литература

1. Аплонов С.В. Геодинамика: учебник / С.В. Аплонов. – Санкт-Петербург: С.-Петерб. ун-та, 2001. – 360 с. ISBN 5-288-02839-7 - Текст: непосредственный.
2. Хаин В.Е. Геотектоника с основами геодинамики: учебник / В.Е. Хаин, М.Г. Ломизе Издание: КДУ, Москва, 2005 г. - 560 с., ISBN: 5-98227-076-8 - Текст: непосредственный.
3. Ciardelli C. Adjoint Waveform Tomography of South America / C. Ciardelli, M. Assumpção, E. Bozdağ, S. van der Lee // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. – 2022. – № 2 (127). URL : <https://doi.org/10.1029/2021JB022575>. (date of the application: 05.05.2022). - Text : electronic.
4. DeMets C. Geologically current plate motions / C. DeMets, R. G. Gordon, D. F. Argus - DOI: 10.1111/j.1365-246X.2009.04491.x - Text : electronic.// *Geophys. J. Int.* (2010) 181, 1–80 (date of the application 06.10.2021).
5. Goodell L. P. Dynamic Earth / L. P. Goodell - Text : electronic. // SERC: Dynamic Earth kmz file for use with Plate Tectonics exercises: [Website]. - URL: <https://serc.carleton.edu/details/files/38010.html> (date of the application 19.09.2021).
6. Goodell L. P. Using Google Earth to Explore Plate Tectonics / L. P. Goodell - Text : electronic. // Pedagogy in Action: Using Google Earth to Explore Plate Tectonics: [Website]. - URL: https://serc.carleton.edu/sp/library/google_earth/examples/49004.html (date of the application 26.10.2021).
7. Google Earth Pro: program. - Text : electronic. // Google Earth: [Website]. - URL: <http://earth.google.com/>. (date of the application 26.10.2021).
8. McGoldrick S. A Practical Guide to Introductory Geology / S. McGoldrick - Text : electronic. // Calgary: Mount Royal University.- 2021/ - 365 p. URL: <https://openeducationalberta.ca/practicalgeology/> (date of the application 01.11.2021).
9. Pfiffner O.A. Mesozoic–Cenozoic Evolution of the Western Margin of South America: Case Study of the Peruvian Andes / O.A. Pfiffner, L. Gonzalez - Text : electronic. // *Geosciences* 2013, Vol. 3, Pages 262-310. – 2013. – № 2 (3). – pp. 262–310. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3263/3/2/262> (date of the application 17.05.2022).

Приложение 1

Таблица координат профилей к заданию

	Начальная точка		Конечная точка	
	Широта	Долгота	Широта	Долгота
1	51°15'	-56°05'	52°15'	-9°15'
2	47°42'	-65°34'	42°49'	-8°45'
3	44°11'	-65°44'	37°05'	-8°08'
4	37°44'	-77°20'	28°36'	-10°16'
5	33°55'	-81°35'	24°34'	-14°04'
6	28°55'	-81°42'	21°07'	-16°20'
7	9°10'	-61°21'	12°05'	-15°58'
8	0°45'	-50°20'	8°26'	-12°40'
9	-3°32'	-40°04'	5°17'	-6°44'
10	-7°16'	-35°29'	6°23'	7°52'
11	-8°39'	-35°19'	2°45'	11°44'
12	-14°23'	-39°33'	-5°21'	13°29'
13	-19°39'	-40°36'	-13°34'	13°21'
14	-20°55'	-41°55'	-17°56'	12°54'
15	-32°56'	-53°45'	-26°21'	16°50'
16	-36°43'	-58°10'	-29°16'	17°45'
17	-43°09'	-66°13'	-33°47'	19°56'
18	-70°00'	00°00'	-33°50'	20°00'
19	-58°00'	10°00'	-30°00'	30°00'
20	-66°35'	102°40'	-33°40'	116°42'
21	-66°00'	127°00'	-31°20'	127°00'
22	-67°00'	132°00'	-31°00'	132°00'
23	-67°00'	142°00'	-37°00'	141°50'
24	80°00'	94°50'	70°31'	-158°55'
25	80°21'	48°12'	76°39'	-119°21'
26	72°38'	71°55'	82°24'	-75°07'

ФЗ № 436-ФЗ	Издание не подлежит маркировке в соответствии с п. 1 ч. 4 ст. 11
----------------	---

Учебное издание

ГРИШКЕВИЧ Владимир Филиппович

НАГЛЯДНАЯ ГЕОДИНАМИКА ЗЕМЛИ С GOOGLE EARTH PRO

В авторской редакции

Подписано в печать 12.09.2022. Формат 60х90 1/16. Усл. печ. л. 3,75.
Тираж 500 экз. Заказ № 2484.

Библиотечно-издательский комплекс
федерального государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования
«Тюменский индустриальный университет».
625000, Тюмень, ул. Володарского, 38.

Типография библиотечно-издательского комплекса.
625039, Тюмень, ул. Киевская, 52.